

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ  
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

«На правах рукопису»  
УДК 621.314

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис) Ю.С. Ямненко  
(ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 171 Електроніка  
(код і назва)

спеціалізації Електронні компоненти і системи

на тему: «Статичний компенсатор реактивної потужності для тягової підстанції»

Виконав: студент II курсу, групи ДС-71мп  
(шифр групи)

Онищенко Олександр Михайлович  
(прізвище, ім'я, по батькові) \_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н., Жуйков В.Я.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) \_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант 1-4 доц., к.т.н., Вербицький Є.В.  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) \_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент проф. к.т.н Кузьмичєв Анатолій Іванович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) \_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2018 року

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Особливості генерування реактивної потужності в тягових підстанціях. Середня споживана потужність 209.67кВт, реактивна потужність 158кВАр, напруга мережі  $U_m=6\text{кВ}$ , напруга навантаження 600В(постійна напруга).

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Проаналізувати складові потужності електричного струму. 2. Висвітлити роботу тягової підстанції і механізми виникнення реактивної потужності. 3. Проаналізувати характер руху тролейбуса. 4. Розробити принципову схему компенсатора.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Схема електрична принципова, слайди презентації.

7. Перелік публікацій. 1) Онищенко О.М., Компенсація реактивної потужності на тягових підстанціях, XXV Міжнародна інтернет — конференція «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2018 РОКУ», збірник статей, Київ 2018. 2) Ямненко Ю.С., Онищенко О.М. Біотелеметричний модуль для бездротової локальної мережі, Вчені записки таврійського національного університету ім.В.І.Вернадського, Серія: «Технічні науки», Том 29(68). №4, Київ, 2018 ст. 181-185.

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	к.т.н., доц., Вербицький Є.В.		

9. Дата видачі завдання 23.04.2018 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строки виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз складових потужності електричного струму	23.04.2018 – 01.05.2018	
2.	Аналіз необхідності компенсації на тяговій підстанції	01.05.2018 – 01.09.2018	
3.	Висвітлення основних джерел і споживачів реактивної потужності	01.09.2018 – 20.09.2018	
4.	Аналіз особливостей роботи тягової підстанції	20.09.2018 – 01.10.2018	
5.	Розробка структури компенсатора	01.10.2018 – 12.10.2018	
6.	Розробка алгоритму покращення коефіцієнту потужності	12.10.2018 – 12.11.2018	
7.	Розробка принципової схеми	12.11.2018 – 26.11.2018	
8.	Розробка стартап-проекту	26.11.2018 – 03.12.2018	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

О.М. Онищенко

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

В.Я. Жуйков

(ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

В роботі розроблено принципову схему компенсатора реактивної потужності в колі тягової підстанції. По результатам аналізу наукових джерел виявлені причини виникнення реактивної потужності як такої, а також розглянуті переваги і недоліки основних типів компенсаторів (джерел реактивної потужності). Проведені дослідження характеру роботи тягової підстанції та запропонована її ідеалізована модель, на базі якої розглядалися процеси, що призводять до споживання реактивної потужності. Також розроблена схема електрична принципова компенсатора, яка дозволяє компенсувати реактивну потужність, споживану троллейбусом шляхом збільшення коефіцієнту потужності майже в 2 рази, що призводить до заощадження близько 95 тис. грн за місяць при оплаті електроенергії. Розроблена схема компенсатора може використовуватись на тягових підстанціях понижувального типу (6 кВ змінної напруги - 600 В постійної напруги) комунальних троллейбусних підприємств.

**Ключові слова:** компенсатор реактивної потужності; коефіцієнт потужності; тягова підстанція; реактивна потужність.

## АНОТАЦИЯ

В работе разработана принципиальная схема компенсатора реактивной мощности в узле тяговой подстанции. По результатам анализа научных источников выявлены причины возникновения реактивной мощности как таковой, а также рассмотрены преимущества и недостатки основных типов компенсаторов (источников реактивной мощности). Проведены исследования характера работы тяговой подстанции и предложена ее идеализированная модель, на базе которой рассматривались процессы, приводящие к потреблению реактивной мощности. Также разработана электрическая принципиальная схема компенсатора, которая позволяет компенсировать реактивную мощность, потребляемую троллейбусом путем увеличения коэффициента мощности почти

в 2 раза, что приводит к экономии около 95тис.грн за месяц при оплате электроэнергии. Разработана схема компенсатора может использоваться на тяговых подстанциях понижающего типа (6кВ переменного напряжения - 600В постоянного напряжения) коммунальных троллейбусных предприятий.

**Ключевые слова:** компенсатор реактивной мощности; коэффициент мощности; тяговая подстанция; реактивная мощность.

## ANOTATION

In the present thesis project was developed compensator for the compensation of reactive power in transient conditions. Based on the analysis, synthesis and systematization of scientific sources, an overview of the main methods of reactive power compensation is highlighted. The advantages and disadvantages of certain types of compensation are assessed. Compensation methods for various types of transient processes are considered. In the present thesis project was developed reactive power compensator for transport substation. According to the analysis of scientific sources, the causes of reactive power were observed, also were described the advantages and disadvantages of the main types of compensators (sources of reactive power).

After analyzing the nature of the work of the transport substation, its idealized model was proposed. On the basis of this model, the processes of consumption of the reactive power were investigated and a basic electrical circuit of the compensator was developed. According to the calculations presented in the work, the presented basic electrical circuit makes it possible to compensate the reactive power consumed by the trolleybus by increasing the power factor (by almost 2 times), which leads to savings of about 95 thousand UAH per month when paying for electricity.

The developed compensator circuit can be used at pull-down substations (6kV AC voltage - 600V DC) of utility trolleybus enterprises.

**Keywords:** reactive power compensator; power factor; transport substation; reactive power.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	7
<b>1. РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ. НЕОБХІДНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ</b>	10
1.1. Тягові підстанції міського електричного транспорту.....	10
1.2. Види потужності електричного струму.....	14
1.2.1 Повна потужність.....	15
1.2.2 Активна потужність.....	15
1.2.3 Реактивна потужність.....	16
Висновки до першого розділу.....	18
<b>2. ДЖЕРЕЛА І СПОЖИВАЧІ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....</b>	19
2.1. Синхронні компенсатори і двигуни.....	20
2.2. Конденсаторні батареї.....	24
2.3. Реактори.....	32
2.4. Комбіновані джерела реактивної потужності.....	36
Висновки до другого розділу.....	38
<b>3. ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ.....</b>	39
3.1. Структура та принцип роботи тягової підстанції.....	39
3.2. Характер руху тролейбуса.....	46
3.3. Оцінка основних параметрів ТП.....	48
3.4. Підключення компенсатора до кола ТП.....	50
Висновки до третього розділу.....	51
<b>4. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....</b>	52
4.1. Визначення теоретичного значення $\cos \varphi$ .....	52
4.2. Структура компенсатора.....	54
4.3. Розрахунок основних елементів компенсатора.....	55
4.4. Покращення параметру коефіцієнта потужності.....	56
4.5. Розрахунок параметрів фільтрів.....	59
4.6. Методи керування тиристором.....	61

4.7. Принципова схема системи керування.....	66
Висновки до четвертого розділу.....	69
<b>5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....</b>	<b>70</b>
5.1. Опис ідеї проекту .....	72
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	73
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	73
5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	75
Висновки до п'ятого розділу.....	77
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>78</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>79</b>
Додаток А. Схема компенсатора з встановленими фільтрами.....	82
ABSTRACT.....	83

## ВСТУП

**Актуальність.** Більшість споживачів електроенергії є електричні машини (трансформатори, асинхронні двигуни, обладнання для дугового зварювання). Таке навантаження, крім активної потужності споживає і реактивну потужність, збільшуючи в середньому на 20-25% повну потужність по відношенню до активної. Параметр, що визначає споживання реактивної потужності, називається  $\cos(\varphi)$ .

Наявність в електромережі реактивної потужності знижує якість електроенергії, а саме: призводить до втрат потужності в електричних лініях, до перепадів напруги в електричних лініях, необхідності завищення потужності силових трансформаторів і перетину кабелів, осіданням напруги в електромережі.

Компенсація РП забезпечує розвантаження генераторів електростанцій і розподільних мереж і трансформаторів від реактивних струмів, і тим самим зменшення втрат потужності, енергії і напруги в лініях і трансформаторів. Як наслідок, збільшується їх пропускна здатність. Застосування установок компенсації реактивної потужності також дозволяє домогтися енергозбереження та економічного ефекту, а це в свою чергу дає можливість використання зекономлених коштів на поліпшення і оновлення необхідного промислового устаткування.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» на кафедрі промислової електроніки в рамках ініціативної науково-дослідницької роботи.

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертації є розробка пристрою компенсації реактивної потужності для тягової підстанції комунального тролейбусного підприємства.



Основними задачами досліджень є :

- 1) визначити причини виникнення реактивної потужності в колі тягової підстанції;
- 2) запропонувати алгоритм підвищення коефіцієнта потужності.

*Предмет дослідження* - особливості генерування реактивної потужності в тягових підстанціях

*Об'єкт дослідження* - методи компенсації реактивної потужності.

**Методи дослідження.** При розв'язанні поставлених у роботі задач для реалізації статичного компенсатора реактивної потужності було використано теорію електричних кіл, елементи вищої математики (розклад сигналу в ряд Фур'є), а також теоретичні засади перетворювальної техніки.

**Наукова новизна досліджень полягає в наступному:**

- 1) розроблено принцип компенсації реактивної потужності для тягової підстанції;
- 2) запропоновано методику зменшення навантаження на силовий трансформатор підстанції.

**Практична цінність отриманих результатів:**

- 1) Запропонована методика підвищення коефіцієнта потужності майже в 2 рази;
- 2) Робота компенсатора може заощадити порядку 90 тис.грн./місяць при оплаті за електроенергію.

**Апробація результатів роботи.** Результати дисертаційних досліджень доповідалися та обговорювалися на XXV Міжнародна інтернет — конференції «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2018 РОКУ», Київ .

**Публікації.** Основні положення і результати, отримані в дисертаційній роботі, були описані в наступних роботах:

1. Онищенко О.М., Компенсація реактивної потужності на тягових підстанціях, XXV Міжнародна інтернет — конференція «НАУКОВІ ПІДСУМКИ 2018 РОКУ», збірник статей, Київ 2018.

2. Ямненко Ю.С., Онищенко О.М. Біотелеметричний модуль для бездротової локальної мережі, Вчені записки таврійського національного університету ім.В.І.Вернадського, Серія: «Технічні науки», Том 29(68). №4, Київ, 2018 ст. 181-185.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 28 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 84 сторінок, у тому числі 81 сторінок основного тексту 31 рисунка та 15 таблиць.

## **1.РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ. НЕОБХІДНІСТЬ КОМПЕНСАЦІЇ**

За наявності некомпенсованої передачі реактивної потужності має місце збільшення плати за електроенергію, що само по собі є серйозною проблемою, яка призводить до додаткових фінансових витрат. У промислових електромережах споживачами реактивної потужності(РП) є: асинхронні двигуни, які споживають приблизно 65-70% РП; - силові трансформатори, на частку яких припадає близько 20-25% РП; - освітлювальні струмоприймачі з газорозрядними лампами, які споживають близько 10% РП; - електропічні установки, що споживають близько 5% РП; - лінії електропередачі і розподільні електромережі, споживають близько 5% РП; - зварювальні трансформатори і регулятори, які споживають приблизно 2% РП;- перетворюючі установки, на частку яких припадає близько 2% РП.

Враховуючи вищесказане, необхідно розглянути питання компенсації реактивної потужності на тяговій підстанції тролейбусного підприємства[1].

### **1.1. Тягові підстанції міського електричного транспорту**

Тролейбусний транспорт, як і будь-який інший міський електричний транспорт, забезпечується електроенергією від загальної енергосистеми міста. Енергопостачання міста зазвичай забезпечує досить велику кількість електричних станцій, об'єднаних в єдину енергетичну систему. Ці електричні станції працюють паралельно на єдину високовольтну мережу електропередачі. Енергетична система забезпечує безперебійне постачання споживачів електроенергією, раціонально використовує електроблок електричних станцій і їх потужності.

Електричні станції в залежності від енергоносія поділяються на теплові, гідроелектричним і атомні.

Електростанції виробляють трифазний змінний струм напругою 6 або 10 кВ при частоті 50 Гц. Передача електроенергії на великі відстані проводиться при підвищеній напрузі (до 35, 110, 220 кВ і вище). Для підвищення напруги передбачені підвищувальні підстанції. Приймається електроенергія знижувальних підстанцій, які знижують напругу до необхідних значень. Для тяги в даний час найдоцільніше застосовувати систему постійного струму або систему однофазного змінного струму промислової частоти. У другому випадку на рухомому складі необхідно монтувати випрямну установку для перетворення змінного струму в постійний.

Переваги системи постійного струму полягають в тому, що тягові характеристики двигунів постійного струму краще, відносно просто регулювання частоти (швидкості) обертання якоря тягового двигуна, габарити і вага електричного обладнання значно менше, а струм, що йде по контактних дротах, не створює електричних перешкод.

Система постійного струму має і ряд недоліків: значну вартість тягових підстанцій для перетворення трифазного змінного струму в постійний; велику електрокорозію, що руйнує підземні металомісткі інженерні споруди. Застосування змінного струму для цілей тяги призводить до ускладнення рухомого складу, зростання втрат електроенергії і перешкод, створюваних контактною мережею в зоні розташування траси. На рис. 1.1 зображена схема електропостачання тролейбуса: 1 - електрична станція, 2 - підвищувальна підстанція, 3 - лінія передачі, 4-понижувальна підстанція, 5 - кабельна лінія електропередачі 6-10 кВ, 6 - тягова підстанція, 7 - кабелі, 8 - контактні дроти, 9 ~ тролейбус.

Переважне застосування для цілей електричної тяги на міському електричному транспорті отримав постійний струм. Трифазний змінний струм напругою 6-10 кВ перетворюється на тягових підстанціях в постійний напругою 600 В, необхідний для енергопостачання тролейбуса, що забезпечує подачу на струмоприймачі струму напругою 550 В.

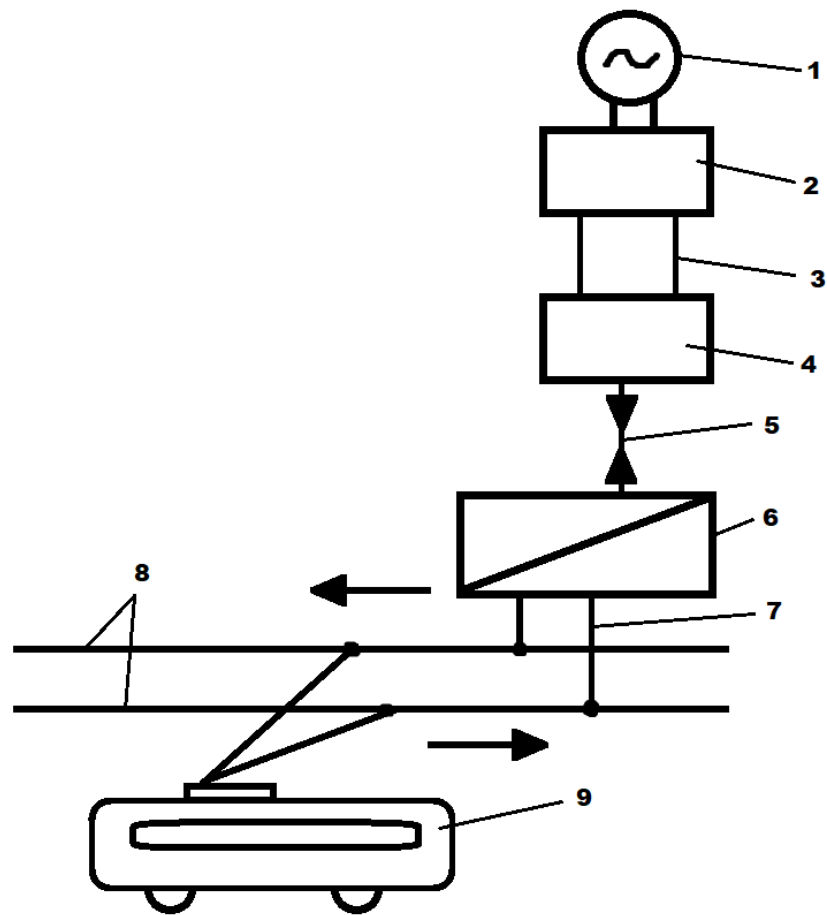


Рис. 1.1. Схема електропостачання тролейбуса

Перехід на більш високу напругу в контактній мережі дозволяє значно економити кольоровий метал контактних проводів, скоротити кількість тягових підстанцій, зменшити вагу і, отже, здешевити застосування електрообладнання рухомого складу, але для цього треба буде розв'язати ще цілий ряд техніко-економічних завдань.

Тягова підстанція 6 (рис.1.1.) по кабелях 5 отримує електроенергію від електростанції (енергосистеми) 1. Перш ніж потрапити на тягову підстанцію, електроенергія проходить підвищувальну підстанцію 2, високовольтну лінію передачі 3 і знижувальні підстанції 4.

Живильні кабелі 7 подають електроенергію на контактні дроти 8, струмознімання з яких здійснюють струмоприймачі тролейбуса 9. Електроенергія надходить в розподільний пристрій високої напруги тягової підстанції. Розподільний пристрій складається зі збірних шин, апаратів

захисту, вимірювальних приладів, оперативних і допоміжних апаратів. Перетворювальні агрегати, що приєднуються до розподільного пристрою, включають в себе силові трансформатори і випрямлячі. Випрямлений струм надходить на розподільчий пристрій постійного струму, звідки по кабелям живлення надходить в контактну мережу.

Розподільний пристрій змінного і постійного струму призначений для прийому і розподілу електроенергії. Він включає комутаційні апарати, апарати захисту і автоматики, прилади вимірювань, а також збірні і з'єднувальні шини. Кабелі, по яких надходить електрична енергія з енергосистеми в розподільний пристрій перетворювальної (тягової) підстанції, зазвичай трижильні марки СБ або АСБ. Кабелі прокладають в землі (в траншеї).

Команду на відключення пошкодженої ділянки ланцюга, елемента схеми або подачу сигналу про порушення нормального режиму роботи здійснює система релейного захисту тягової підстанції. Релейний захист має вибірковість дії (селективність), швидкодією, чутливістю і високою надійністю. Такий захист забезпечує відключення тільки пошкодженого елемента ланцюга, виробляючи його в мінімально короткий термін і спрацьовує при найменших порушеннях нормального режиму, але не реагуючи на зміни, супутні нормального режиму роботи (стрибки струму). Релейний захист реагує на інформацію, яка надходить від автоматичних приладів (реле), що сигналізують про зміни в режимі роботи, і подає команду в схему відключення або сигналізації.

В якості перетворювачів струму на тягових підстанціях в даний час застосовуються випрямні агрегати, виконані на напівпровідникових елементах і мають здатність проводити струм в одному напрямку (вентилі). Напівпровідниковим матеріалом служить кремній, кристали якого пропускають струм тільки в одному напрямку. Напівпровідники чутливі до зміни температури або електричної напруги і мають по відношенню до них критичні рівні, за межами яких настає пробій, що порушує здатність до нормального функціонування. Маса вентилів потужних тягових підстанцій не

перевищує декількох кілограмів. Охолодження вентилів здійснюється потоком повітря.

Тягові підстанції повинні надійно забезпечувати рухомий склад електроенергією. Тому передбачений автоматичний безперервний контроль за справною роботою технічних пристроїв тягової підстанції, за виробництвом контрольних вимірювань, за роботою системи сигналізації та управління роботою обладнання. Пристрої автоматики і телемеханіки здійснюють безперервний контроль і управління роботою обладнання перетворювальної підстанції без участі обслуговуючого персоналу. Ці пристрої збільшують надійність, скорочують матеріальні витрати і покращують режим роботи тягових підстанцій.[2]

Удосконалення техніки контролю і управління, висока надійність кремнієвих перетворювальних агрегатів дозволяють здійснювати енергопостачання рухомого складу децентралізованим способом від одноагрегатних тягових підстанцій, які знаходяться під оперативним керівництвом і контролем районного пункту диспетчеризації. Децентралізоване енергопостачання забезпечує стійке і безперебійне живлення контактної мережі електричною енергією. Однак це не виключає використання централізованої системи енергопостачання з багатоагрегатними тяговими підстанціями.

Враховуючи сказане вище, можна підсумувати, що питання компенсації реактивної потужності для тягової підстанції має ключовий характер, бо веде до зменшення потужності трансформатора і як наслідок габаритів та ціни на промислове обладнання. Тому для вирішення цього питання, необхідно спочатку проаналізувати складові потужності змінного струму.

## **1.2. Види потужності електричного струму**

Можна вважати, що потужність у колі змінного струму, виражається комплексним числом таким чином, що активна потужність є його дійсною

частиною, реактивна потужність — уявною частиною, повна потужність — модулем, а кут  $\varphi$  (зсув фаз) — аргументом. Для такої моделі виявляються справедливими всі виписані нижче співвідношення.

### 1.2.1. Повна потужність

Одиниця повної електричної потужності — вольт-ампер (ВА, ВА). Повна потужність — величина, що дорівнює добутку дійсних значень періодичного електричного струму  $I$  у колі і напруги  $U$  на затисках  $S = UI$ , пов'язана з активною і реактивною потужностями співвідношенням:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (1.1)$$

де  $P$  — активна потужність,  $Q$  — реактивна потужність (при індуктивному навантаженні  $Q > 0$ , а при ємнісному  $Q < 0$ ).

Векторна залежність між повною, активною і реактивною потужностями, виражається формулою:

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}. \quad (1.2)$$

Повна потужність, має практичне значення, як величина, що описує навантаження, котрі фактично накладаються споживачем на елементи підвідної електромережі (дроти, кабелі, розподільні щити, трансформатори, лінії електропередачі), оскільки ці навантаження залежать від споживаного струму, а не від фактично використаної споживачем енергії. Саме тому номінальна потужність трансформаторів і розподільних щитів вимірюється у вольт-амперах, а не у ватах.[3]

### 1.2.2. Активна потужність

Одиниця вимірювання — ват (W, Вт). Середнє за період  $T$  значення миттєвої потужності називається активною потужністю:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt. \quad (1.3)$$

У колах однофазного синусоїдального струму



$$P = UI \cos \varphi. \quad (1.4)$$

де  $U$  і  $I$  — середньоквадратичні значення напруги і струму,  $\varphi$  — кут зсуву фаз між ними. Для кіл несинусоїдного струму, потужність електричного струму, дорівнює сумі відповідних середніх потужностей окремих гармонік. Активна потужність, характеризує швидкість незворотного перетворення електричної енергії в інші види енергії (теплову і електромагнітну). Активну потужність може бути також виражено через силу струму, напругу й активну складову опору кола  $r$  або її провідність  $g$  за формулою

$$P = I^2 r = U^2 g. \quad (1.5)$$

У будь-якому електричному колі, як синусоїдного, так і несинусоїдного струму, активна потужність всього кола, дорівнює сумі активних потужностей окремих частин кола; для трифазних кіл, потужність електричного струму визначається як сума потужностей окремих фаз. З повною потужністю  $S$ , активна, пов'язана співвідношенням

$$P = S \cos \varphi. \quad (1.6)$$

У теорії довгих ліній (аналіз електромагнітних процесів у лінії передачі, довжина якої порівнянна з довжиною електромагнітної хвилі), повним аналогом активної потужності є транзитна потужність, яка визначається як різниця між потужністю, що передається далі, та потужністю, відбитою назад.[4]

### 1.2.3. Реактивна потужність

Одиниця вимірювання — вольт-ампер реактивний (var, VAR). Реактивна потужність — величина, що характеризує навантаження, що створюють в електротехнічних пристроях, коливання енергії електромагнітного поля у колі синусоїдного змінного струму, дорівнює добутку середньоквадратичних значень напруги  $U$  та струму  $I$ , помноженому на синус кута зміщення фаз  $\varphi$  між ними:

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (1.7)$$

(якщо струм відстає від напруги, зсув фаз вважається позитивним, якщо випереджає — негативним). Реактивна потужність пов'язана з повною потужністю  $S$  і активною потужністю  $P$ , співвідношенням:

$$|Q| = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (1.8)$$

Фізичний сенс реактивної потужності — це енергія, що передається від джерела на реактивні елементи приймача (індуктивності, конденсатори, обмотки двигунів), а потім повертається цими елементами назад до джерела, протягом одного періоду коливань, віднесена до цього періоду.

Необхідно відзначити, що величина  $\sin\varphi$  для значень  $\varphi$  від 0 до плюс  $90^\circ$  є позитивною величиною. Величина  $\sin\varphi$  для значень  $\varphi$  від 0 до  $-90^\circ$  є від'ємною величиною. Згідно з формулою  $UI\sin\varphi$ , реактивна потужність може бути як позитивною величиною (якщо навантаження має активно-індуктивний характер), так і від'ємною (якщо навантаження має активно-ємнісний характер). Така обставина підкреслює той факт, що реактивна потужність не бере участь у роботі електричного струму. Коли пристрій має позитивну реактивну потужність, то прийнято говорити, що він її споживає, а коли негативну — то виробляє. Але це чиста умовність, пов'язана з тим, що більшість пристроїв, які споживають електрику (наприклад, асинхронні двигуни), а також винятково активне навантаження, що під'єднується крізь трансформатор, є активно-індуктивними.

Синхронні генератори, встановлені на електричних станціях, можуть як виробляти, так і споживати реактивну потужність, залежно від величини струму збудження, що протікає в обмотці ротора генератора. Завдяки цій особливості синхронних електричних машин, здійснюється регулювання заданого рівня напруги мережі. Для усунення перевантажень і підвищення коефіцієнта потужності електричних установок, здійснюється компенсація реактивної потужності. [5]

Застосування сучасних електричних вимірювальних перетворювачів на мікропроцесорній техніці, дозволяє виробляти точнішу оцінку величини енергії, що повертається від індуктивного та ємнісного навантаження до

джерела змінної напруги. Вимірювальні перетворювачі реактивної потужності, що використовують формулу  $UI\sin\varphi$ , більш прості і значно дешевші вимірювальних перетворювачів на мікропроцесорній техніці.

На основі вищесказаного можна виділити декілька джерел реактивної потужності, що будуть описані в наступному розділі.

### **Висновки до першого розділу**

Застосування сучасних електричних вимірювальних перетворювачів на мікропроцесорній техніці, дозволяє виробляти точнішу оцінку величини енергії, що повертається від індуктивного та ємнісного навантаження до джерела змінної напруги. Вимірювальні перетворювачі реактивної потужності, що використовують формулу  $UI\sin\varphi$ , більш прості і значно дешевші вимірювальних перетворювачів на мікропроцесорній техніці.

На основі вищесказаного можна виділити декілька джерел реактивної потужності, що будуть описані в наступному розділі.

## 2.ДЖЕРЕЛА І СПОЖИВАЧІ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Поняття джерела реактивної потужності (ДРП) відносять до будь-яких пристроїв, здатним цілеспрямовано впливати на баланс реактивної потужності в електроенергетичній системі або системі електропостачання об'єкта. Цей вплив може бути досягнуто збільшенням (зменшенням) як генерованої, так і споживаної реактивної потужності. Джерело реактивної потужності - це обов'язково регульований пристрій, потужність якого змінюється вручну або автоматично, дискретно (ступенями), плавно або плавно-східчасто. Основним параметром регулювання ДРП є напруга в точці його підключення або реактивна потужність навантаження, для компенсації якої він призначений, або і те, і інше одночасно. Для підвищення чутливості регулювання в регулятор ДРП вводять канали, що реагують на швидкість зміни напруги або реактивної потужності. Структура органів регулювання ДРП і реалізований закон регулювання визначаються його призначенням. Завдяки можливості регулювання реактивної потужності ДРП є багатофункціональним пристроєм.

В електричних системах ДРП застосовують в мережах напругою 110 кВ і вище для вирішення наступних завдань:

- зниження втрат активної потужності і електроенергії;
- регулювання напруги в вузлах навантаження;
- збільшення пропускної спроможності ліній електропередачі;
- збільшення запасів статичної стійкості ліній електропередачі і генераторів електростанцій;
- поліпшення динамічної стійкості ліній електропередачі;
- обмеження перенапруг;
- симетрування режиму.

У системах електропостачання промислових підприємств крім перерахованого, ДРП використовують з метою компенсації реактивної потужності, споживаної потужним навантаженням. Крім цього, в системах з

нелінійним(несинусоїдальним) навантаженням, що генерує струми вищих гармонік, ДРП можуть виконувати і роль фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Регульована компенсація реактивної потужності забезпечується за допомогою шунтуючих пристроїв, що підключаються до шин підстанції або навантаження паралельно. Ці пристрої можна розділити на дві групи. До першої групи ДРП відносяться синхронні машини: синхронні генератори електростанцій, синхронні компенсатори, синхронні двигуни. Ці пристрої дозволяють плавно регулювати реактивну потужність як в режимі генерування, так і споживання. До другої групи належать статичні ДРП або статичні компенсатори реактивної потужності. До них відносяться конденсаторні батареї, реактори(але не струмообмежуючі), пристрої на базі перетворювачів(випрямлячі, інвертори) з штучною комутацією тиристорів або їх комбінації.[6]

## **2.1. Синхронні компенсатори і двигуни**

Синхронний компенсатор (СК) - один з видів синхронної машини, призначений для роботи без активного навантаження на валу. Використовується для стабілізації напруги в точці підключення в межах  $\pm 5\%$  номінального значення, а також для генерування і споживання реактивної потужності, чим і впливає на режим системи електропостачання. Синхронні компенсатори встановлюються в тих точках енергетичної системи або системи електропостачання, де графік навантаження змінюється в широких межах, в зв'язку з чим суттєво змінюється баланс реактивної потужності.

На рис. 2.1. наведені схема заміщення і векторні діаграми, що пояснюють принцип дії синхронної машини в режимі синхронного компенсатора. Застосувавши другий закон Кірхгофа для схеми заміщення СК (рис. 2.1.а), отримаємо рівняння:

$$E_q U_c = j I x_d . \quad (2.1)$$

з якого знайдемо вираз струму статора:

$$I = -j \frac{E_q + U_c}{x_d}. \quad (2.2)$$

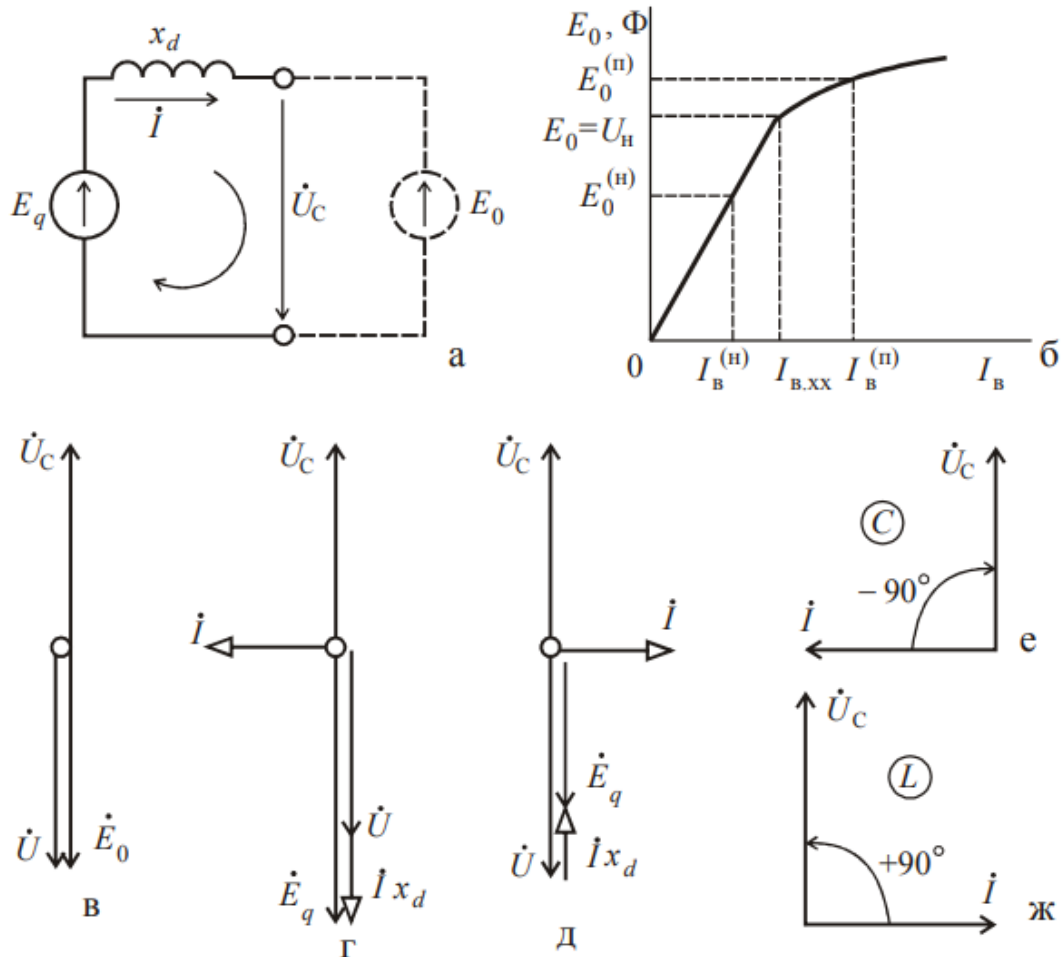


Рис. 2.1. Схема заміщення (а), характеристика холостого ходу (б) і векторні діаграми синхронної машини: в - при порушенні холостого ходу; г, е - при збудження; д, ж - при недозбудженні

При навантаженні синхронної машини не тільки реактивної, а й активним навантаженням з'являється активна складова струму  $\dot{I}_a$ .

Між струмом  $\dot{I}$  і напругою  $\dot{U}_c$  кут  $\varphi$  не дорівнює  $90^\circ$ , але реактивна складова струму зберігається. Відповідно зберігаються і властивості синхронної машини як джерела реактивної потужності. Векторні діаграми синхронного генератора, який виробляє і активну, і реактивну потужність, наведені на рис. 2.2. Порядок їх побудови і режими збудження ті ж, що і для

режиму синхронного компенсатора. Синхронні двигуни в системах електропостачання застосовуються при приводі виробничих механізмів, що не вимагають регулювання частоти обертання. Їх застосування доцільне при потужності понад 50 кВт. Векторні діаграми приведені на рис. 2.3. Як джерело реактивної потужності синхронний двигун має ряд переваг:

- малочутливий до несинусоїдальної напруги;
- знаходиться безпосередньо в цеху, тому активні втрати на передачу реактивної потужності мінімальні;
- питомі капітальні витрати на реактивну потужність синхронних двигунів (і генераторів) нижче (орієнтовно на порядок), ніж конденсаторів, так як зміна  $\cos \varphi_{\text{ном}}$  двигуна від 1 до 0,9 призводить до збільшення його повної потужності на 11%, а реактивна потужність змінюється від 0 до 48% по відношенню до  $P_{\text{ном}}$ ;
- в більшості випадків наведені витрати менше, ніж для асинхронного двигуна в поєднанні з конденсаторною батареєю;
- забезпечує плавне регулювання реактивної потужності і підтримує постійну напругу в точці підключення до мережі;
- підвищує межу стійкості навантаження.

Синхронні генератори володіють аналогічними достоїнствами: це джерела реактивної потужності з низькою питомою вартістю, з плавним і автоматичним регулюванням генерації реактивної потужності у функції напруги мережі. На відміну від двигунів передача реактивної потужності від генератора здійснюється на значні відстані з великими втратами потужності і енергії на одиницю реактивної потужності.

Це обмежує використання генераторів в якості джерела реактивної потужності для промислових підприємств.

Синхронні генератори і двигуни виробляють реактивну потужність як супутній продукт при виконанні основного завдання генерації та споживання активної потужності, тобто при перетворенні одного виду енергії в інший.

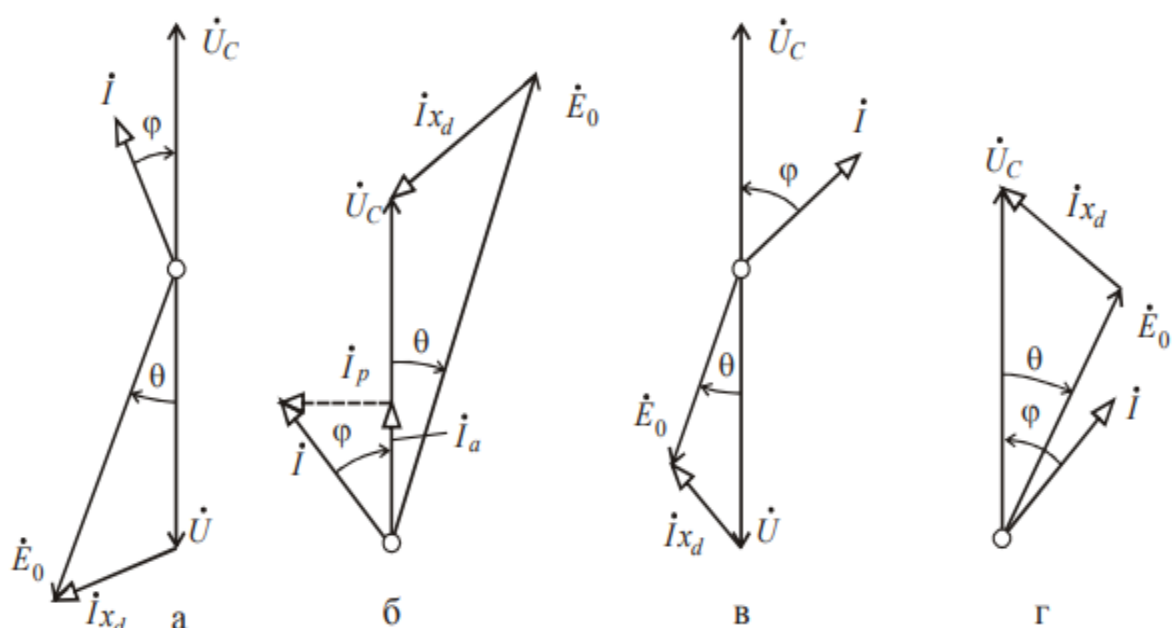


Рис. 2.2. Векторні діаграми синхронного генератора при його роботі з перезбудженням (а, б) і недозбудженням (в, г),  $\theta$ -кут навантаження

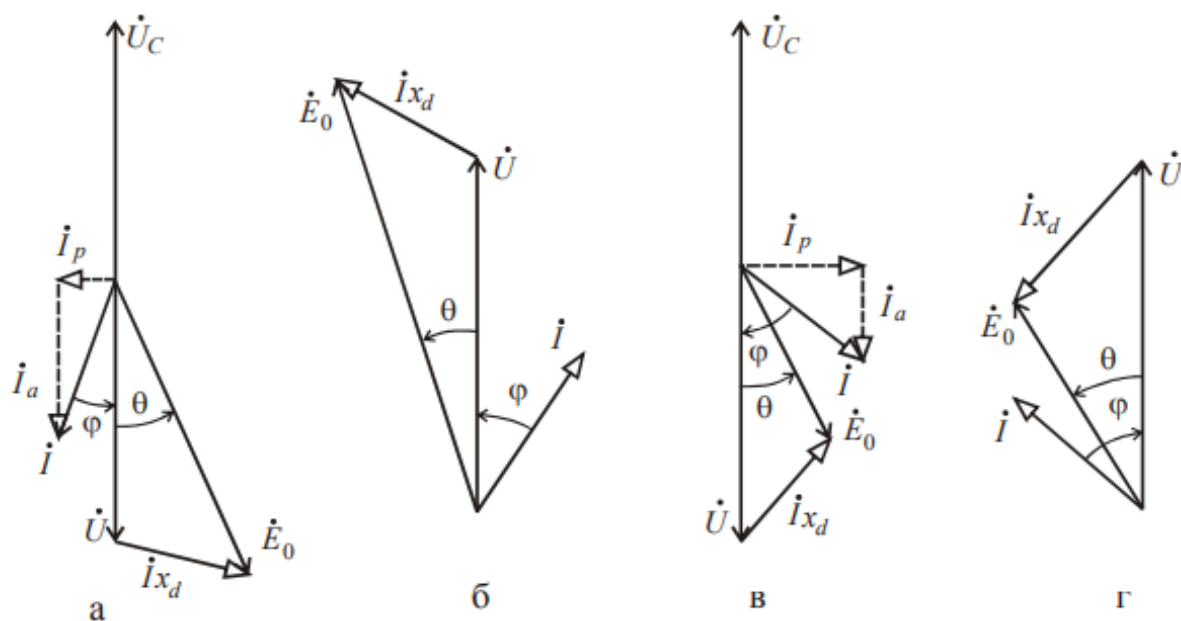


Рис. 2.3. Векторні діаграми синхронного двигуна при його роботі з перезбудженням (а, б) і недозбудженням (в, г)

Синхронні компенсатори спеціально встановлюються для вироблення тільки реактивної потужності на додаток до основних джерел. Тому питомі витрати (грн/кВАр) на вироблення реактивної потужності генератором і двигуном практично дорівнюють нулю, так як капітальні витрати на їх



установку відносяться за прямим призначенням машин. Витрати на установку СК відносяться на реактивну потужність, так як виробництво реактивної потужності і є їх прямим призначенням, а ці витрати значні.[7]

## 2.2. Конденсаторні батареї

Конденсаторні батареї (КБ) - простий і надійний статичний пристрій. Їх збирають з окремих конденсаторів, які випускаються на різні потужності і номінальну напругу.

Конденсатор - це пристрій, який складається з двох провідників, розділених діелектриком. Конденсатор, якщо до нього прикладена напруга, здатний накопичувати електричний заряд (заряджатися) і віддавати його (розряджатися). У просторі між провідниками, які можуть мати будь-яку форму, при зарядці конденсатора утворюється електричне поле. Заряд конденсатора тим більше, чим більше його ємність і прикладена до його провідникам напруга. Ємність конденсатора, в свою чергу, тим більше, чим більше внутрішня поверхня провідників, що утворюють конденсатор, і чим менше відстань між цими провідниками.

Конденсатор характеризується втратами активної потужності, які призводять до його нагрівання. Втрати тим більше, чим вище прикладена напруга, його частота і ємність конденсатора.

Крім цього, втрати залежать і від властивостей діелектрика, що визначаються тангенсом кута діелектричних втрат ( $tg\delta$ ). Залежно від типу і призначення конденсатора вони становлять від 0,5 до 4 Вт / кВАр.

Для компенсації реактивної потужності застосовують косинусні конденсатори, призначені для роботи при частоті 50Гц. Їх потужність складає від 2 до 100кВАр.

Конденсатори класифікуються за:

- номінальною напругою;
- родом установки (для зовнішньої і внутрішньої);

- видом пропитки;
- за габаритними розмірами.

Конденсатори з номіальною напругою до 660 В випускаються в однофазному та трифазні, а конденсатори з номіальною напругою понад 1000 В - тільки в однофазному. При трифазному виконанні секції в конденсаторі з'єднані в трикутник.

Конденсатори на напругу до 1000 В включно виготовляються з вбудованими плавкими запобіжниками, послідовно включеними з кожною секцією. Конденсатори більшої напруги не мають вбудованих запобіжників і вимагають їх окремої установки. Перевантажувальна здатність конденсаторів по струму можлива до 30% від номінального, а по напрузі - до 10%. Групу конденсаторів, з'єднаних між собою паралельно або послідовно, або паралельно-послідовно, називають конденсаторної батареєю. Конденсаторна батарея, обладнана комутаційної апаратурою, засобами захисту і управління, утворює конденсаторну установку (КУ).

Потужність, що генерується КБ, при її заданій ємності  $C$  пропорційна квадрату прикладеної напруги і частоті:

$$Q_{KB} = U^2 \omega. \quad (2.3)$$

Тому нерегульовані КБ володіють негативним регулюючим ефектом, що, на відміну від синхронних компенсаторів, є їх недоліком. Це означає, що потужність БК знижується зі зниженням прикладеної напруги, тоді як за умовами режиму цю потужність необхідно збільшувати.

Регулюючий ефект по реактивної потужності КУ з однієї секції показаний на рис. 2.4а.

При зниженні напруги від  $U_{ном}$  до  $U_{min}$  реактивна потужність знижується пропорційно квадрату напруги від  $Q_{ном}$  до  $Q_{min}$ . Подолання цього недоліку - формування КБ з декількох секцій, кожна з яких, керована регулятором потужності і / або напруги, підключається до мережі через свій вимикач, нарощуючи таким чином ємність батареї в цілому.

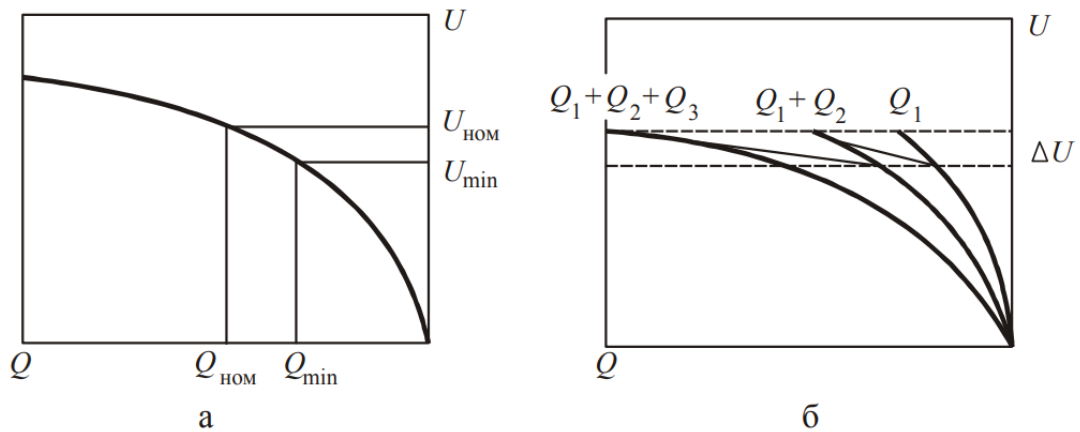


Рис. 2.4. Статичні характеристики конденсаторної установки, що складається з однієї (а) і трьох (б) секцій

Статична характеристика конденсаторної установки, що складається з трьох секцій, наведена на рис. 2.8 (б). Потужність КУ при зниженні напруги зростає ступенями  $Q_1$ ,  $Q_1 + Q_2$ ,  $Q_1 + Q_2 + Q_3$ .

Ступеневе регулювання вимагає введення в регулятор напруги КУ зони нечутливості  $\Delta U$ . У межах цієї зони при зниженні напруги підключення чергової секції неприпустимо. Невиконання цієї умови призвело б до нестійкої роботи КУ. Ширина зони нечутливості повинна бути більше, ніж збільшення напруги, викликане підключенням чергової секції відразу після її включення. В іншому випадку напруга на КУ досягне напруги установки спрацьовування на відключення цієї секції відразу після її включення. Імовірність такого ефекту тим більше, чим більша потужність секції, що підключається і чим менше зона нечутливості регулятора КУ.

Конденсаторна установка складається з декількох секцій, що мають загальну систему управління. Низьковольтні КУ напругою 380 В (рис. 2.5) збираються з трифазних конденсаторів, включених паралельно. Для захисту таких КУ від КЗ і перевантаження застосовують запобіжники. Наприклад, установки УКМ58 представляють собою металеву шафу порошкового фарбування, ступенем захисту не нижче IP31, в якому розташовуються спеціалізовані комплектуючі для компенсації реактивної потужності (косинусні конденсатори, конденсаторні контактори і автоматичний регулятор

реактивної потужності), а також апаратура захисту.

Високовольтні конденсаторні установки (рис. 2.6) збираються з однофазних конденсаторів, включених послідовно-паралельно. Призначені для роботи в мережах зі змінним навантаженням. У даних пристроях встановлений мікропроцесорний контролер, який автоматично вибирає потрібну ступінь компенсації при даному навантаженні. Це забезпечує нормальну роботу в години мінімального і максимального навантаження, а також виключає перекомпенсацію мережі.

Застосування регульованих високовольтних конденсаторних установок забезпечує роботу без участі обслуговуючого персоналу в автоматичному режимі. Застосування УКРМ (6) 10 кВ забезпечує зниження струмового навантаження на лініях електропередач, трансформаторних підстанціях, а також стабілізувати роботу енергосистеми.

Включення КУ супроводжується стрибками струму, а відключення - перенапруженням. Це негативно впливає на термін служби конденсаторів і комутаційної апаратури. Тому КУ, обладнані вимикачами (контакторами), не рекомендується вмикати-вимикати більше 2-4 разів за добу. Для обмеження стрибків струму конденсатори перед включенням повинні бути розряджені за допомогою розрядних пристроїв.

Конденсатори в силу їх параметричних властивостей чутливі до спотворень синусоїдальної форми кривої напруги, тобто до вищих гармонік струму. Опір конденсатора  $X_c = \frac{1}{n\omega C}$  тим менше, чим вище частота  $n\omega$  гармоніки в несинусоїдній кривій прикладеної напруги. В результаті за рахунок вищих гармонік, що проникають в конденсатор, зростають і втрати потужності  $\Delta P$  в конденсаторах, що призводить до їх додатковому нагріванню скороченню терміну служби.

Застосування КБ пов'язане з можливістю резонансних явищ через утворення індуктивними і ємнісними елементами мережі послідовних і паралельних ланцюгів. Резонансні явища супроводжуються посиленням

напруги (резонанс напруг) або струмів (резонанс струмів) на частотах вище номінальної при наявності в мережі джерел вищих гармонік струму.

На резонансній частоті індуктивне  $X_{L(n)}$  і ємнісні  $X_{C(n)}$  опори рівні, тобто  $n\omega L = \frac{1}{n\omega C}$ , де  $X_{L(n)} = n\omega L$  - вхідний опір мережі в точці підключення КБ, опір якої  $X_{C(n)} = \frac{1}{n\omega C}$ .

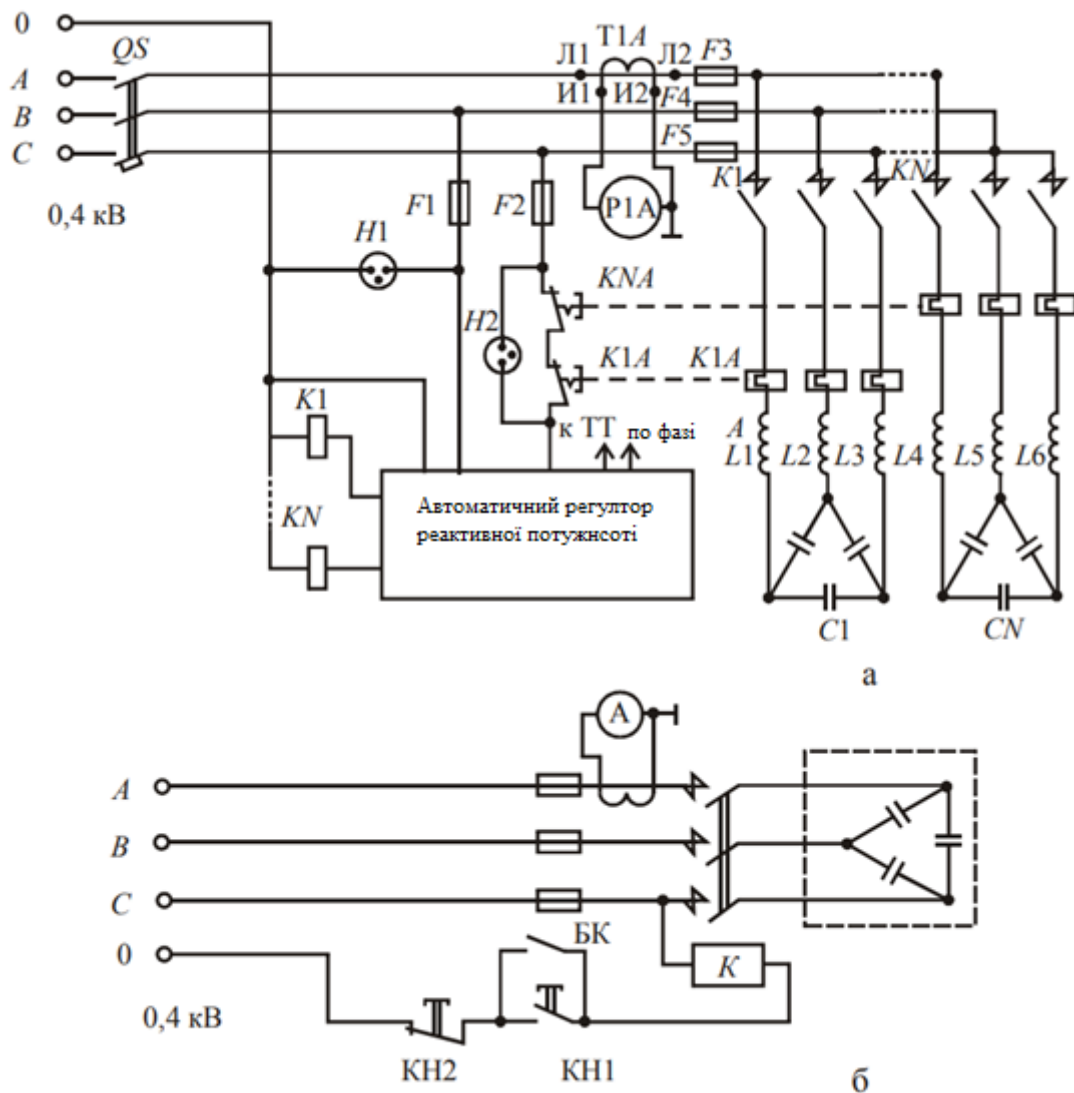


Рис. 2.5. Спрощена принципова схема конденсаторної установки на напругу 0,4 кВ

Завжди при виборі потужності КБ і, отже, її опору, а також місця підключення КБ необхідно переконатися у відсутності резонансних явищ. Це відноситься і до конденсаторних батарей(рис.2.6), що входять до складу фільтрокомпенсуючих пристроїв.

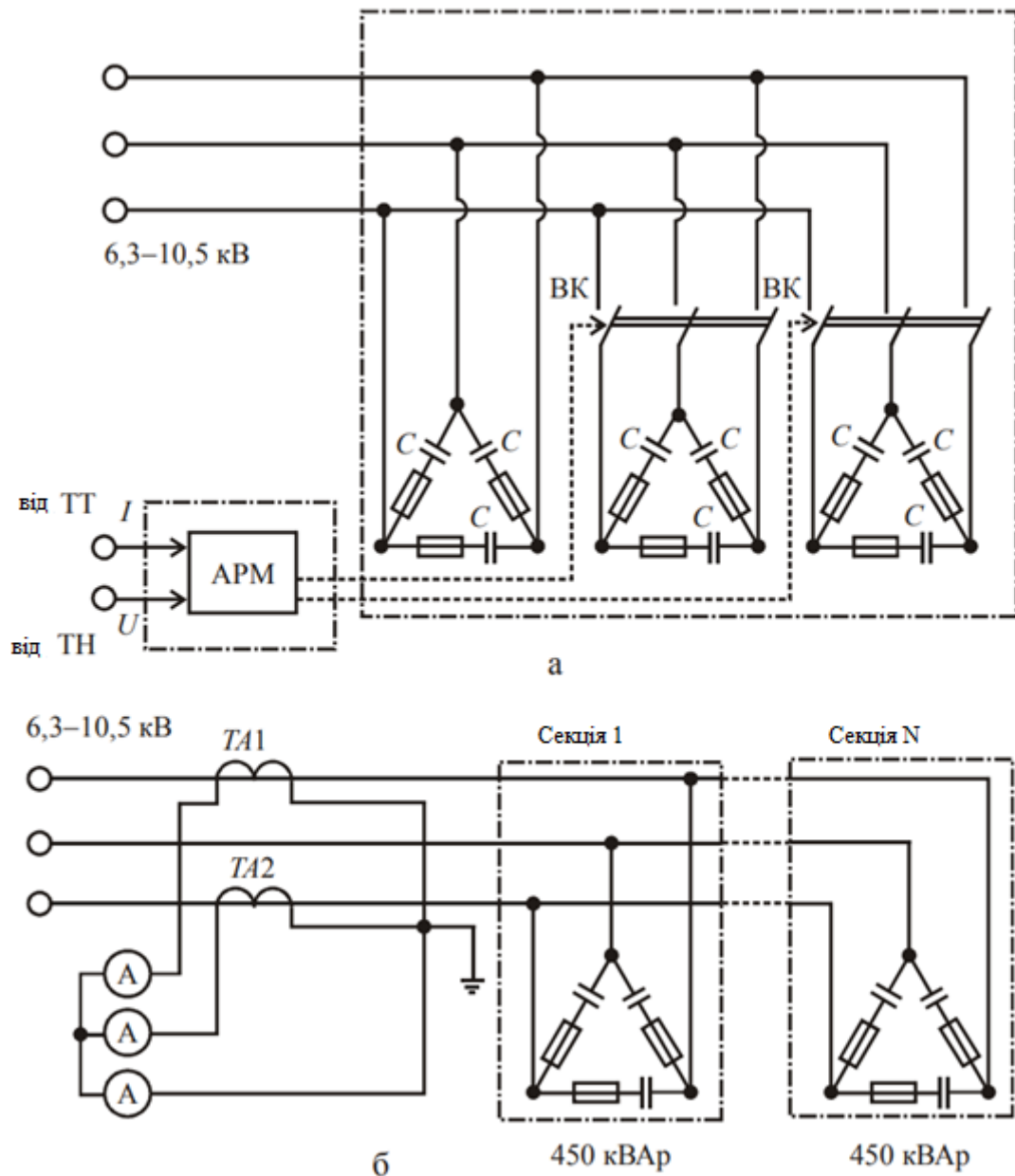


Рис. 2.6. Спрощена принципова схема конденсаторної установки на напругу 6,3-10,5 кВ

Застосування конденсаторних установок в задачах швидкодіючого регулювання реактивної потужності, частого перемикання секцій КБ практично неможливо через стрибки струму і перенапруги, що виникають при їх комутації звичайними вимикачами. Заміна звичайних вимикачів тиристорними ключами, які забезпечують комутацію КБ в певний момент часу, дозволяє знизити стрибки струму при включенні батарей і перенапруги при їх відключенні, зняти обмеження щодо частоти комутацій КБ і надати

пристроєм властивості, при яких вони можуть застосовуватися в задачах компенсації реактивної потужності, в тому числі і в мережах з різкозмінного навантаження.

Тиристорні ключі складаються з двох включених зустрічно паралельно тиристорів (рис. 2.7). Їх застосовують для регулювання конденсаторних батарей і реакторів. В силу специфіки комутаційних властивостей конденсаторів і реакторів управління їх потужністю за допомогою тиристорів принципово різне.

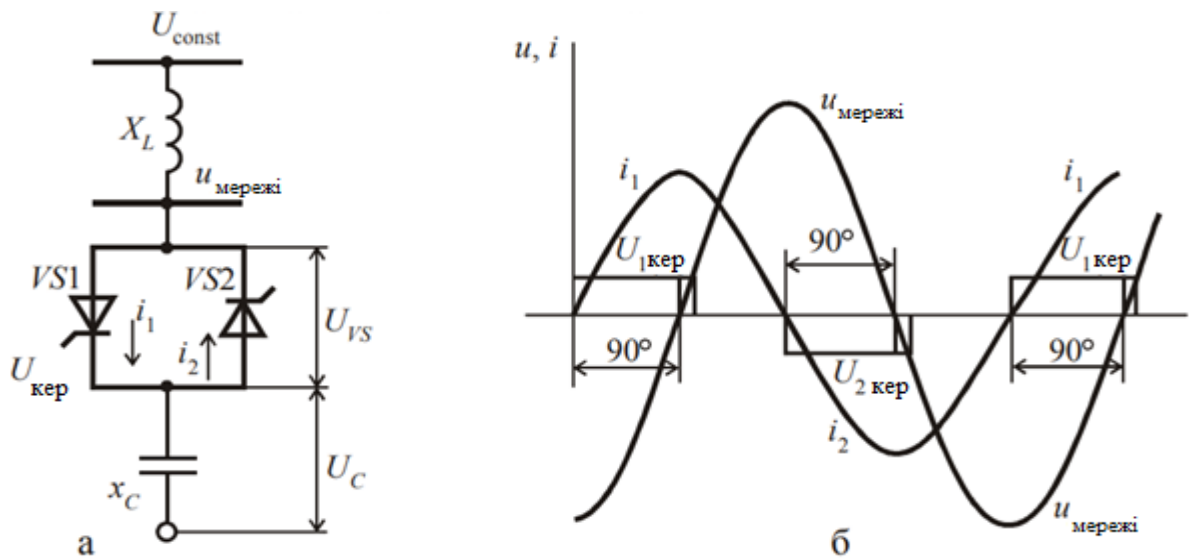


Рис. 2.7. Тиристорний вимикач для комутації конденсаторних батарей: а- принципова схема однієї фази; б - струм і напруга на КБ в сталому режимі.

Для обмеження стрибків струму тиристор слід відкривати в той момент часу, коли миттєве значення напруги мережі і напруга на КБ рівні (ідеальний випадок) або близькі. Для обмеження перенапруг при відключенні КБ тиристор слід закривати при переході струму в ньому через нульове значення.

Дотримуючись цього принципу, можна практично виключити стрибки струму і перенапруги, знявши таких чином обмеження на частоту перемикання КБ. Однофазна схема КБ, комутуваною тиристорами, наведена на рис. 2.7а. Як видно з рис. 2.7б, робота пристрою в сталому режимі, який настає після відкриття тиристора через 0,01-0,02 с, не супроводжується ні стрибками струму, ні перенапруженнями.

На рис. 2.8. показаний статичний тиристорний компенсатор (СТК) в однофазному виконанні, що складається з трьох секцій КБ, кожна з яких комутується своїм тиристорним ключем. Статичні характеристики таких пристроїв аналогічні наведеним на рис. 2.8.

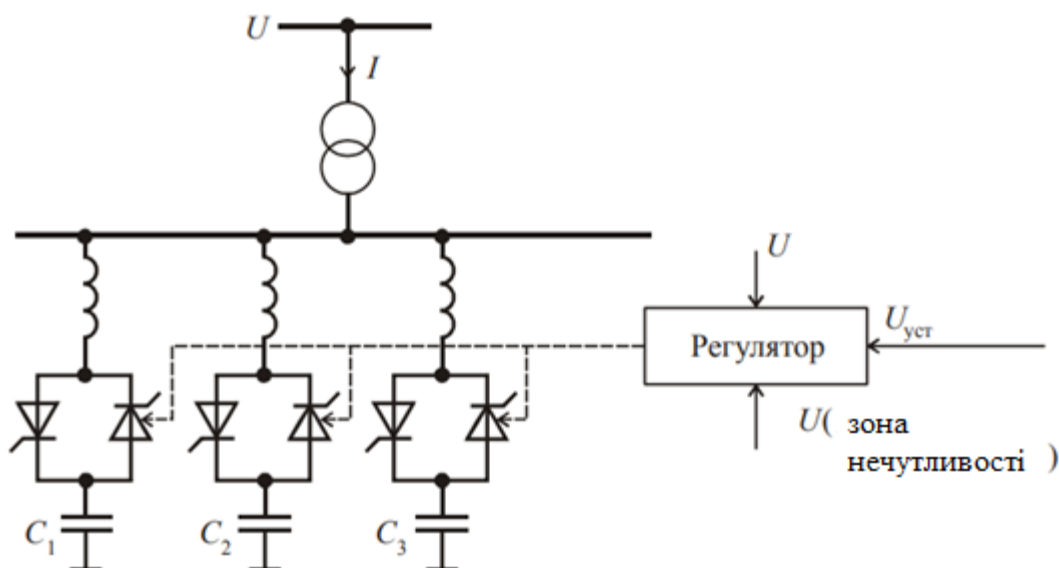


Рис. 2.8. Принципова схема СТК, що складається з трьох секцій конденсаторних батарей, комутуваних тиристорами

Зберігаються і вимоги, що пред'являються до регулятора щодо зони нечутливості. Однак число включень і відключень секцій КБ тут не обмежена, і вони можуть здійснюватися по черзі через кожні 0,02 с, тобто через один період промислової частоти.

Також існує низка вимог до конденсаторних установок, що використовуються в задачах компенсації реактивної потужності (табл. 2.2)

Таким чином для компенсації реактивної потужності використовують спеціальні косинусні конденсатори, призначені для роботи на частоті 50 Гц. Їх потужність є у межах 10-100 квар.

Шкала номінальних напруг – 230 В – 10,5 кВ. Такі конденсатори можуть витримувати перевантаження за струмом до 30 % від номінального і за напругою до 10 % від номінального значення.[8]



Таблиця 2.2.

## Вимоги до конденсаторів в приладах компенсації РП

№ п./п.	Найменування параметру	Вимоги по нормативному документу	Нормативний документ
1.1	Номинальна частота, Гц	50	ГОСТ 6697-83, п. 3
1.2	Номинальна напруга КУ, кВ	0,4; 1; 3; 6; 10; 15; 20; 35; 110; 150; 220	ГОСТ 29322-2014, п. п. 3.1, 3.3, 3.4
1.3	Номинальні напруги одиничних конденсаторів, кВ	0,23; 0,38; 0,4; 0,415; 0,5; 0,525; 0,66; 0,69; 1,05; 3,15/ $\sqrt{3}$ ; 3,15; 6,3/ $\sqrt{3}$ ; 6,6; 10,5/ $\sqrt{3}$ ; 10,5; 11; 15/ $\sqrt{3}$ ; 15; 21/ $\sqrt{3}$ ; 21; 22/ $\sqrt{3}$ ; 22	ГОСТ 1282-88, п. 2.2
1.4	Відхилення значення ємності від номінальної, не більше%(-для одиничних конденсаторів-для конденсаторних блоків)	-5 ÷ +15 -0 ÷ +10	ГОСТ 1282-88, п. 3.5; ГОСТ 27389-87, п. 2.11
1.5	Відношення максимального значення ємності до мінімального, не більше	1,08	ГОСТ 1282-88, п. 3.5
1.6	Втрати в конденсаторах, Вт /	0,2	
1.7	Тангенс кута діелектричних втрат	Не повинен перевищувати значень, встановлених для конкретних типів конденсаторів	ГОСТ 1282-88, п. 3.9

### 2.3.Реактори

Зазвичай реактор підключається за допомогою вимикача або відділювача безпосередньо на шини електропередачі або до третинної обмотки трансформатора. Високовольтний реактор може бути одно- або трифазним. Осердя реактора виконується або з зазором, або броньового типу.

Статична характеристика реактора лінійна, тобто реактор має постійний реактивний опір  $X_L = \omega L$ , где  $L$  – індуктивність реактора. Низьковольтні реактори не мають сталевих осердь. Вимикачі, призначені для комутації реакторів, можуть бути обладнані зовнішніми резисторами, а самі реактори – розрядниками для обмеження перенапруг, викликаних відключенням електропередачі.

Статична характеристика реактора зі сталевим осердям лінійна в робочому діапазоні, а за його межами вона може бути і нелінійною (рис. 2.9). Швидкодія реактора, тобто час виходу на усталений режим після його включення, становить близько 100 мс. Такий реактор, функціонуючи в робочому діапазоні, не є джерелом вищих гармонік струму. Вищі гармоніки можуть виникати в струмі реактора в тому випадку, якщо підвищення напруги на ньому виведе його характеристику на нелінійну частину або в так званий режим насичення (ділянка 2 на рис. 2.9). Втрати в реакторі складають 0,2-0,4% його номінальної потужності. Такі реактори нечутливі до перенапруг з надструмами. Реактори мають позитивний регулюючий ефект, тобто збільшують споживання реактивної потужності при збільшенні напруги, та сприяють її обмеженню.

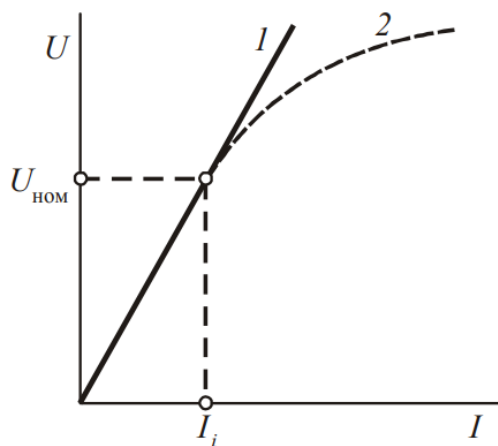


Рис. 2.9. Статична характеристика шунтового реактора: 1 - без сердечника; 2 - зі сталевим сердечником

Тому ректори застосовують для регулювання напруги в протяжних електропередачах напругою 220 кВ і вище, а також для компенсації зарядної

потужності в них. Встановлена потужність реактора може становити від 10 МВАр в розподільних мережах до 150 МВАр в мережах 750 кВ. Реактори встановлюються на кінцевих і проміжних підстанціях. Їх включення і відключення здійснюється експлуатаційним персоналом за розпорядженням диспетчера системи.

Реактором, що насичуються називається реактор, робочий діапазон регулювання якого знаходиться в насиченій частині його статичної характеристики. Завдяки цьому такий реактор можна розглядати як параметричний пристрій для регулювання реактивної потужності. Опір реактора в нелінійній частини характеристики змінюється в залежності від прикладеної до нього напруги. Зі збільшенням напруги струм в реакторі інтенсивно зростає, збільшуючи споживану реактивну потужність і, тим самим, сприяючи стабілізації напруги в точці його підключення.

У зв'язку з тим, що робочий діапазон реактора знаходиться в нелінійній частини характеристики, його слід розглядати як джерело вищих гармонік струму. Для їх компенсації застосовують складні 6- і 9-стрижневі осердя і спеціальні схеми з'єднання обмоток. Застосування таких реакторів через складність їх конструкції доволі обмежена. На рис. 2.10 приведена принципова схема ДРП на базі такого реактора.

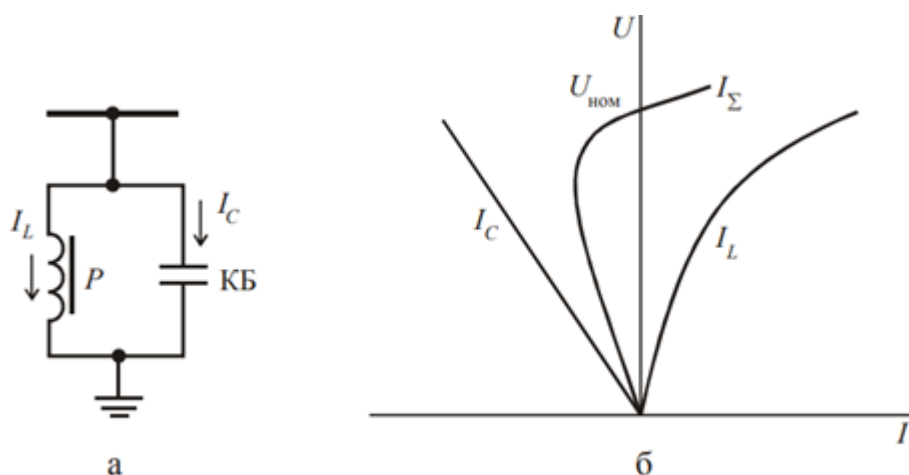


Рис. 2.10. Параметричний ДРП з реактором, що насичується: а - принципова схема; б - статична характеристика

Тут паралельно включена КБ дозволяє забезпечити параметричне регулювання як в режимі споживання, так і генерування реактивної

потужності. Відповідні статичні характеристики наведені на тому ж малюнку. При цьому потужність КБ, яка, як правило, виконує і функції фільтрокомпенсуючі пристрої, вибирається таким чином, щоб при номінальному напрузі сумарна потужність ІРП дорівнювала нулю. Тоді при збільшенні напруги вище  $U_{\text{ном}}$  джерело споживає, а при зниженні нижче  $U_{\text{ном}}$  генерує реактивну потужність.

Для плавного регулювання реактори, на відміну від конденсаторів, можна включати через тиристорні ключі, зміна кута управління якими і забезпечує зміну струму в реакторі. Принципова схема такого плавно регульованого реактора приведена на рис. 2.11 а.

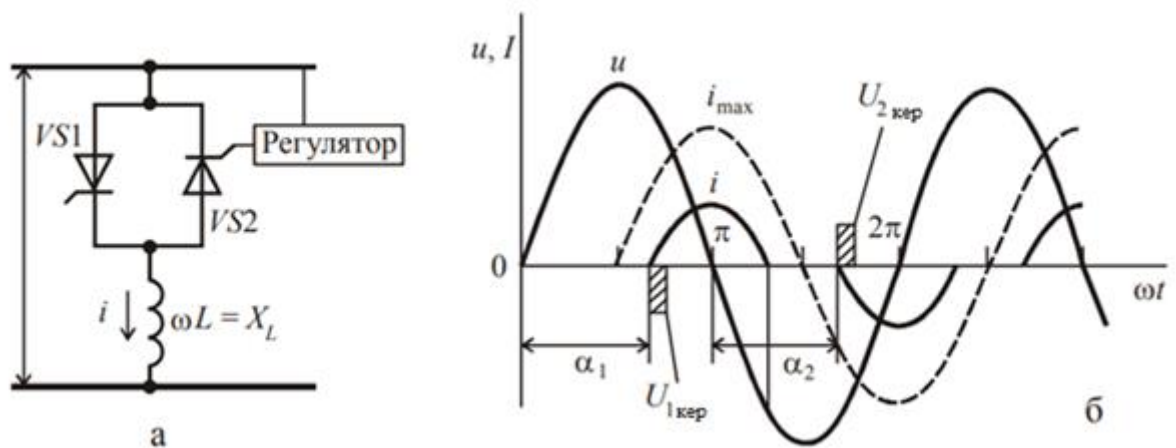


Рис. 2.11. Реактор, що комутується тиристорами: а - принципова схема однієї фази; б - діаграма струмів і напруги при  $\alpha > \frac{\pi}{2}$

Регулювання потужності реактора забезпечується зміною струму в ньому шляхом збільшення або зменшення кутів управління  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  відповідними тиристорами VS1 і VS2, які включені зустрічно-паралельно. При цьому завжди  $\alpha_1 = \alpha_2$ . Якщо  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , тиристири відкриті повністю, струм в реакторі максимальний і синусоїдальний (при синусоїдальній напрузі). Цей струм показаний пунктирною лінією на рис. 2.11 б. У міру збільшення  $\alpha$  і його зміни в діапазоні  $(\frac{\pi}{2}; \pi)$  струм в реакторі зменшується, втрачаючи при цьому синусоїдальну форму. Форма цього струму на рис. 2.11 б показана суцільною лінією.

Перша гармоніка цього струму по відношенню до повного струму  $I_L = U/X_L$  становить

$$\frac{I_{(1)}}{I_{(2)}} = \frac{1}{\pi} [2(\pi - a) + \sin 2a]. \quad (2.5)$$

Статична характеристика реактора в залежності від першої гармоніки струму  $I_{(1)}$  показана на рис. 2.12. Статизм характеристики, тобто кут її нахилу в робочому діапазоні (ділянка 1), що визначається на- будівництвами регулятора, вибирається таким чином, щоб з ростом напруги струм в реакторі зростав, що і забезпечує стабілізацію напруги в робочому діапазоні регулювання від  $a = \frac{\pi}{2}$  до  $\pi$ .

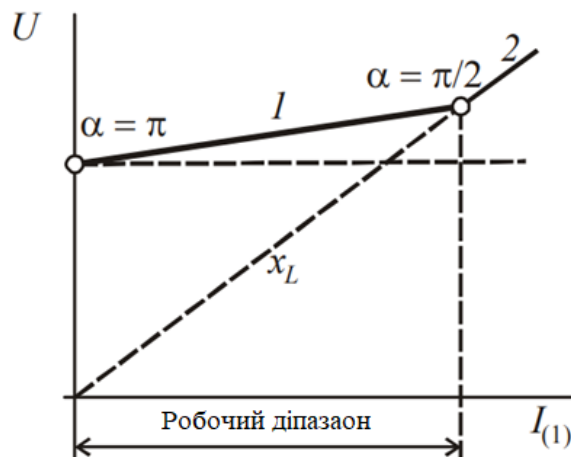


Рис. 2.12. Статична характеристика реактора при плавному управлінні тиристорами

При  $a < \frac{\pi}{2}$ , реактор втрачає керованість (тиристори відкриті повністю) і переходить на природну характеристику (ділянка 2), яка визначається його власним опором  $X_L$ . Недолік реактора, керованого тиристорами, пов'язаний з тим, що при кутах  $a > \frac{\pi}{2}$  він стає джерелом вищих гармонік струму. Порядок гармонік і їх значення близькі до гармонік, що генерується 6-пульсним перетворювачем. Для їх компенсації реактори включають так само, як і перетворювачі, через трансформатори з розщепленою обмоткою, зібраною по схемі  $Y / \Delta / Y$ . Крім того до складу ДРП такого типу включають

фільтрокомпенсуючі пристрої. Джерела реактивної потужності, зібрані за такою схемою, можна віднести до комбінованих ДРП.[9]

## 2.4. Комбіновані джерела реактивної потужності

Комбіновані ДРП застосовують тоді, коли необхідно забезпечити плавне регулювання реактивної потужності в режимі як її споживання, так і генерування. Такі ДРП складаються з керованих тиристорами реакторів або насичуваних реакторів і комутованих вимикачів або тиристорами конденсаторних батарей. Принципова схема такого ДРП, який відомий як статичний тиристорний компенсатор (СТК), наведена на рис. 2.13.

Робочий діапазон регулювання реактивної потужності, встановлена потужність нерегульованої або східчасто регульованою батареї, потужність регульованих тиристорами реакторів вибираються в залежності від призначення СТК.

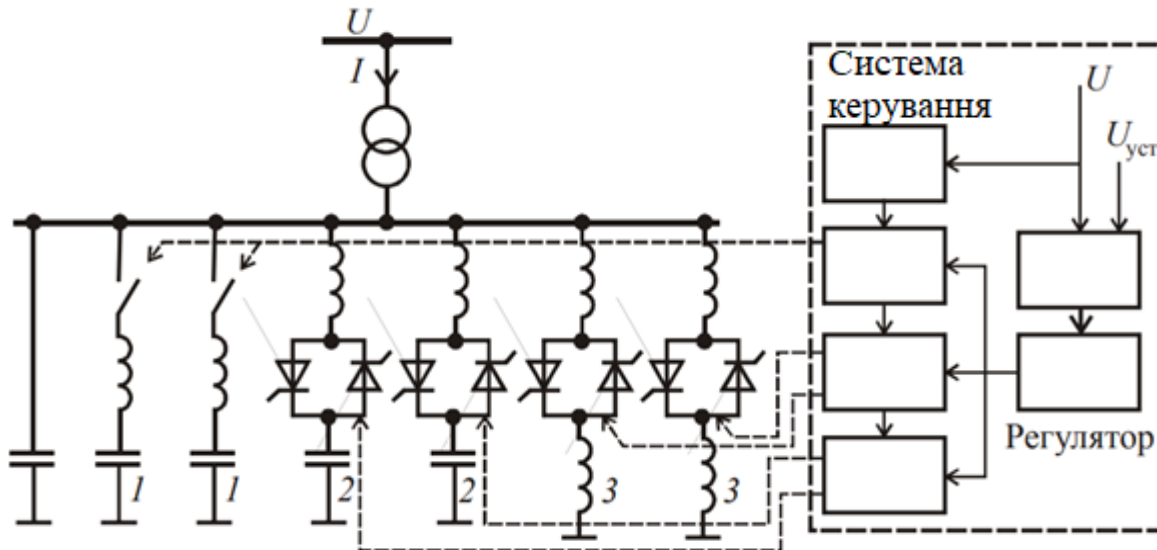


Рис. 2.13. Принципова схема комбінованого СТК: 1 - комутувана вимикачами КБ; 2 - комутувана тиристорами КБ; 3 - керовані тиристорами реактори

Можливі, наприклад, такі співвідношення цих потужностей для СТК, що складається з нерегульованою секції КБ і регульованого тиристорами реактора:

- встановлені потужності реактора і КБ рівні  $Q_p = Q_{KB}$ ;
- встановлена потужність реактора більше потужності КБ, наприклад  $Q_p = 2Q_{KB}$ .

У першому випадку завдяки тому, що потужність реактора регулюється в діапазоні  $0 < Q_p < 1$ , а  $Q_{KB} = -1$ , сумарна потужність СТК може змінюватися в діапазоні  $(-1; 0)$ . Робочий діапазон регулювання реактивної потужності розташовується в області режимів від генерування потужності, що дорівнює встановленій потужності КБ, до нуля, коли тиристори реактора відкриті повністю. Статична характеристика такого СТК приведена на рис. 2.14а.

У другому випадку потужність реактора може змінюватися в діапазоні  $0 < Q_p < 2$ , а потужність нерегульованої КБ залишається рівною  $Q_{KB} = -1$ .

Такий СТК може працювати в режимі генерування і споживання реактивної потужності так, що  $-1 \leq Q_{СТК} \leq 1$  (рис. 2.14б). [10]

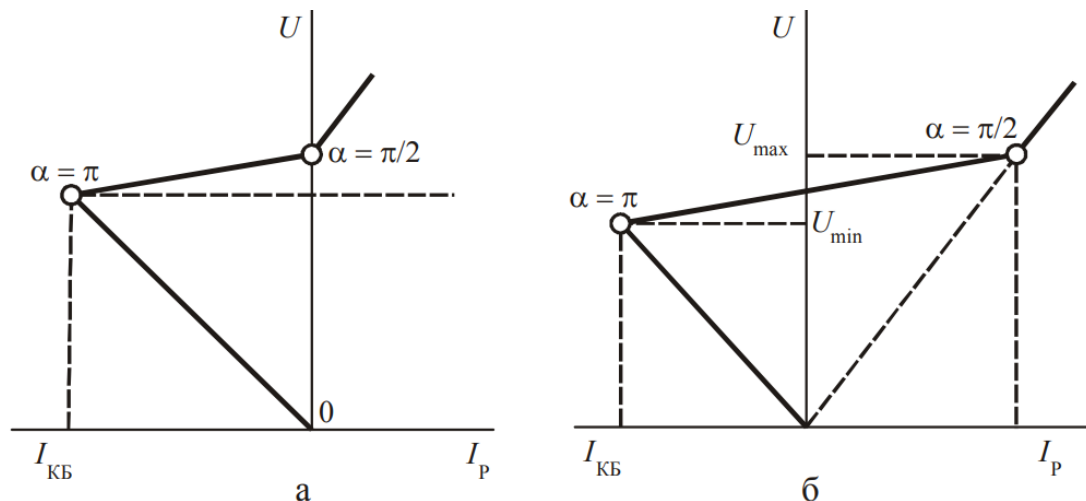


Рис. 2.14. Статичні характеристики комбінованого СТК: а – при  $Q_p = Q_{KB}$ ; б – при  $Q_p = 2Q_{KB}$

## Висновки до другого розділу

Як можна бачити, існує низка рішень для компенсації реактивної потужності для промислових об'єктів. Для того, щоб вибрати найбільш підходящий, необхідно проаналізувати структуру тягової підстанції. Також необхідно з'ясувати, причини виникнення реактивної потужності в колі тягової підстанції, що і буде зроблено в наступному розділі.

### **3.ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ**

#### **3.1. Структура та принцип роботи тягової підстанції**

В умовах міста тягові підстанції отримують електроенергію від живлячого центру зазвичай по кабельних вводах. Трифазний змінний струм напругою 6 або 10кВ надходить по вводах через лінійні роз'єднувачі, високовольтні вимикачі, трансформатори струму та шинні роз'єднувачі на збірні шини розподільчого пристрою 6 або 10кВ підстанції. З збірних шин електроенергія розподіляється на перетворюючі агрегати і трансформатори власних потреб.

Для живлення вимірювальних приладів, релейного захисту, лічильників в розподільних пристроях 6-10кВ встановлюють трансформатори струму і напруги. Здебільшого трансформатори напруги приєднуються безпосередньо до вводів після лінійних роз'єднувачів. Таке приєднання дає можливість постійно контролювати напругу на живильному кабелі навіть при відключеному високовольтному вимикачі. Захист трансформатора напруги здійснюється плавкими запобіжниками.

Збірні шини бувають подвійними і одинарними. На тягових підстанціях трамвая і тролейбуса зазвичай застосовують одинарні збірні шини, розділені роз'єднувачами на дві або три секції. Перетворювальний агрегат складається з силового трансформатора, до вторинної обмотки якого приєднані аноди випрямляча. Первинна обмотка силового трансформатора приєднується до збірних шин 6 або 10кВ через роз'єднувач, високовольтний вимикач, трансформатори струму. Випрямлений струм з катода випрямляча надходить через шунт, автоматичний швидкодіючий вимикач і роз'єднувач на головну-позитивну шину підстанції. Негативним полюсом випрямного агрегату є середня точка зрівняльного реактора, що з'єднує нульові точки двох зворотних зірок вторинної обмотки силового трансформатора.



Середня точка зрівняльного реактора приєднується через роз'єднувач до негативної шини підстанції. Від позитивної шини через шинні роз'єднувачі, лінійні автоматичні вимикачі, шунти, перемикачі запасної шини по живлячим кабелям 600В випрямлений струм надходить в контактну мережу ліній трамвая і тролейбуса. Ланцюг струму замикається через силове обладнання рухомого складу, рейки і землю або негативний контактний провід, роз'єднувачі на негативну шину підстанції.

У розподільчому пристрої випрямленого струму 600В монтується також запасна позитивна шина з запасним вимикачем, що дає можливість проводити ревізію і тимчасову заміну будь-якого з лінійних вимикачів без зняття напруги з лінії і передавати навантаження на сусідню підстанцію або приймати з неї навантаження. Одноагрегатні підстанції працюють в децентралізованій системі живлення контактної мережі. При такій системі кожна одноагрегатна підстанція живить дві ділянки контактної мережі та секційний ізолятор на мережі встановлюється у тягової підстанції.

Кожна ділянка контактної мережі харчується паралельно від двох сусідніх підстанцій (рис. 3.1.). Від підстанції відходять два позитивних живлячих кабелі і два негативних відсмоктуючих кабелі. Позитивні кабелі живлення захищені швидкодіючими автоматичними вимикачами.

При виході з ладу однієї одноагрегатної підстанції в системі децентралізованого живлення вона повністю розвантажується сусідніми підстанціями (рис. 3.2).

В цьому випадку для збереження паралельного живлення контактної мережі від решти в роботі суміжних підстанцій на кожній підстанції є секційний вимикач, який включається автоматично при відключенні лінійних вимикачів, поєднуючи обидві ділянки, що живляться даною підстанцією.

Для живлення споживачів власних потреб тягової підстанції встановлюють один або два трансформатора власних потреб, що приєднуються до збірних шин змінного струму 6 або 10кВ через роз'єднувачі

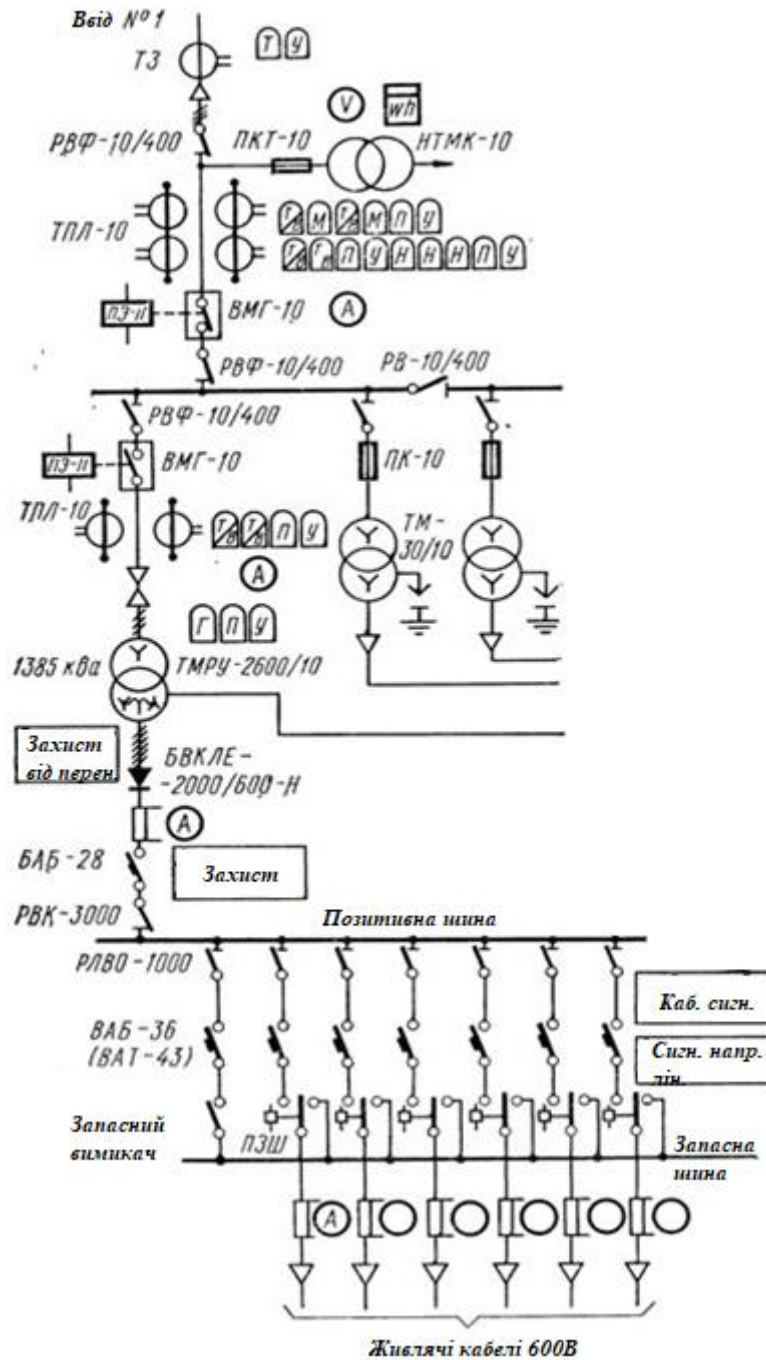


Рис.3.1. Однолінійна схема тягової підстанції

Для живлення в аварійних режимах найбільш відповідальних споживачів власних потреб влаштовують резервні вводи трифазного змінного струму напругою 220В від джерела, що не залежить від наявності напруги на збірних шинах 6 або 10кВ тягової підстанції.

Якщо вводи 6-10кВ на підстанції працюють по черзі, в разі неможливості прокладки резервного введення 220 в, на підстанції встановлюють два трансформатора власних потреб, з яких один, як зазвичай, приєднується до збірних шин 6-10 кВ і є робочим трансформатором(рис.3.2).

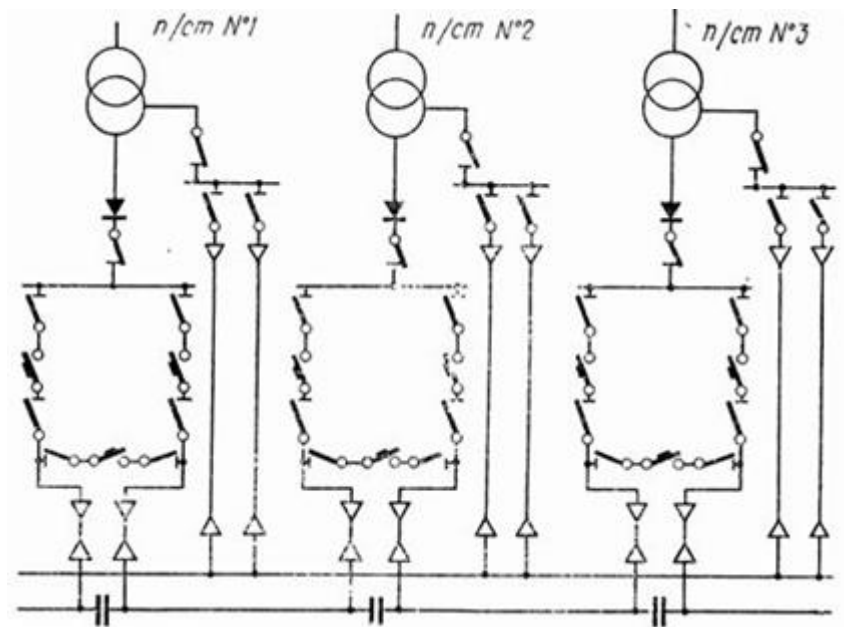


Рис.3.2. Схеми живлення контактної мережі одноагрегатними підстанціями

А інший - до резервного вводу 6–10кВ до вимикача замість вимірювального трансформатора напруги і служить в якості резерву живлення споживачів власних потреб при зникненні напруги на робочому вводі, одночасно виконуючи функції трансформатора напруги по контролю напруги на резервному вводі.[10]

В цьому випадку для живлення вимірювальних приладів і приладів обліку трансформатор напруги приєднується до збірних шин 6-10кВ. Для обліку витрати електроенергії від трансформатора, приєданого до резервного вводу, на ньому встановлюються окремо прилади обліку.

Таким чином ідеалізовану модель тягової підстанції можна представити у вигляді трифазного мостового випрямляча, що живить контактну мережу активно-індуктивного характеру(рис.3.3.).

Трифазна мостова схема випрямлення (схема Ларіонова) приведена на рис. 3.3 а, а часові діаграми струмів і напруг при  $L_d = \infty$  - на рис. 3.3б. Вентилі V2, V6, V4, у яких з'єднані аноди, називають анодної трійкою вентилів; V1, V3, V5, у яких з'єднані катоди, - катодною трійкою вентилів.

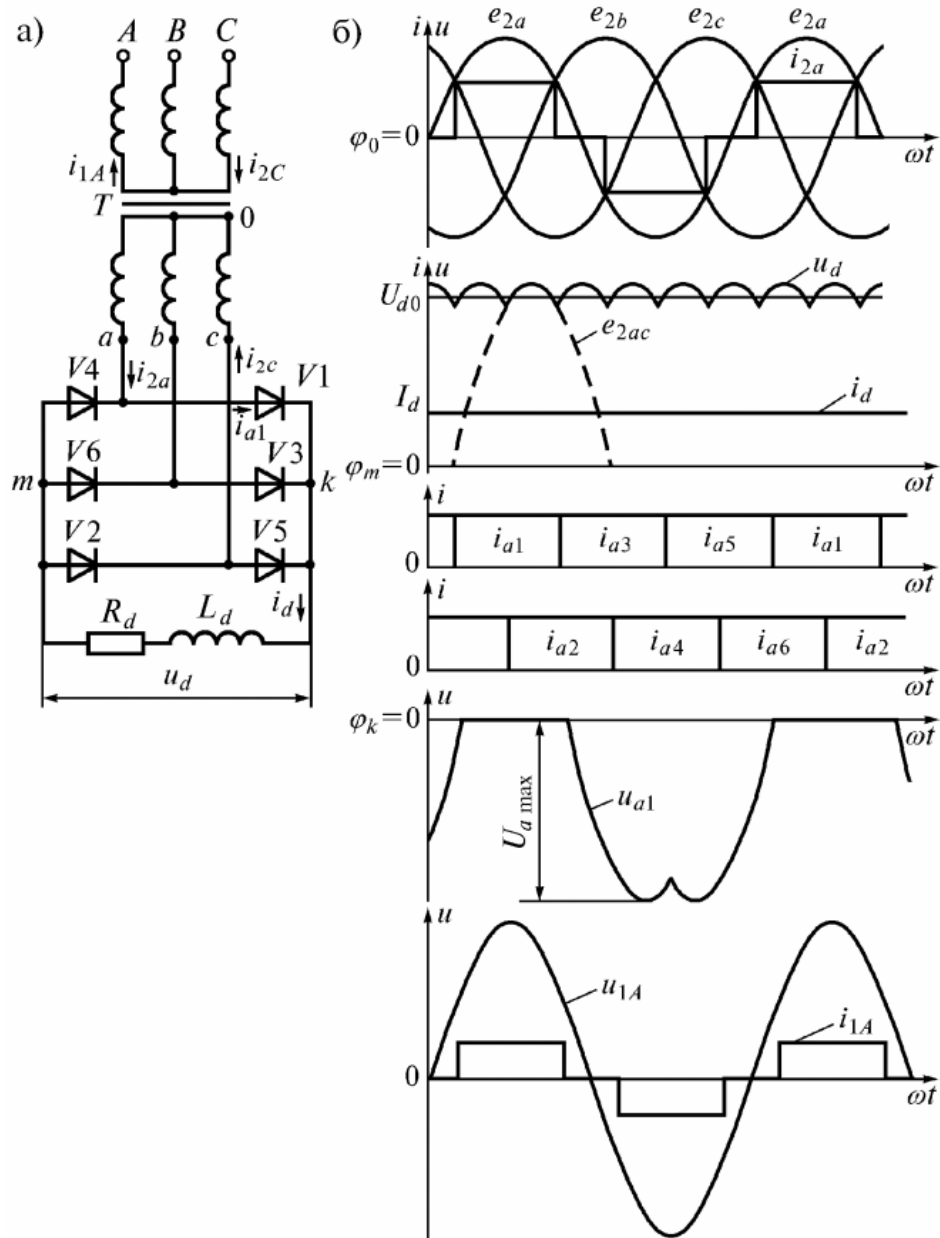


Рис.3.3. Трифазна мостова схема випрямляча (схема Ларіонова) (а) та діаграми струмів і напруг, що ілюструють її роботу при  $L_d = \infty$  (б)

У катодній трійці вентилів проводить вентиль, у якого анод має найбільший позитивний потенціал; в анодній трійці вентилів проводить вентиль, у якого катод має найбільший негативний потенціал. Якщо в даний

момент фаза а найбільш позитивна, а с – найбільш негативна, то струм проходить від фази а через V1 в навантаження, через V2 на фазу с. Нумерація вентилів відповідає порядку їх роботи. Випрямлена напруга  $u_d$  формується з верхівок лінійних напруг. Струм навантаження  $i_d$  через наявність у схемі індуктивності згладжений. На малюнку він представлений прямою лінією. Струми через вентиля  $i_{a1}...i_{a6}$  зображуються прямокутниками, відповідними ділянками провідності. Вторинний струм  $i_{2a}$  змінний, а первинний  $i_{1A}$  має таку ж форму. На відміну від трифазної нульової схеми трансформатор працює в нормальних умовах.[11]

В ідеалізованому варіанті маємо миттєву комутацію діодів, де 1-а гармоніка струму синфазна з напругою – компенсація в цьому випадку не потрібна. Однак в реальних системах має місце  $L_s$  – індуктивність розсіювання трансформатора(рис.3.4.), що унеможливорює миттєву комутацію вентилів. Внаслідок чого струм переходить з одного діода в інший за певний час – виникає кут комутації  $\gamma$ .

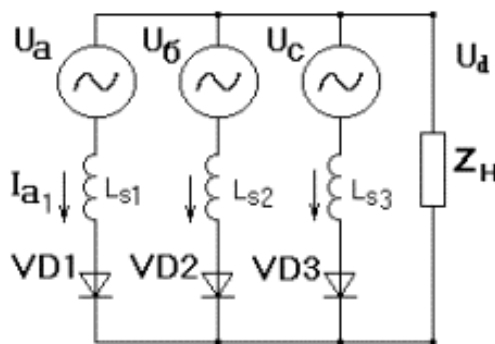


Рис.3.4 Схема заміщення випрямляча

На інтервалі  $[t1; t2]$  (рис.3.5.) за першим законом комутації струм VD1 не може стрибком змінитися до нуля, а спадає за експоненціальним законом. Струм в ланцюзі діода VD2 також наростає по експоненті. При цьому фазовий зсув приблизно рівний  $\frac{\gamma}{2}$ . До навантаження прикладається напруга 2-х фаз ("а" і "с"), що впливає на форму випрямленої напруги. Це зменшує рівень

випрямленої напруги і збільшує рівень пульсацій напруги на навантаженні.

При роботі на індуктивне навантаження відбувається аналогічне: вплив на форму випрямленої напруги комутаційних затримок, пов'язаних з індуктивними елементами навантаження. Інтервал "комутаційної затримки" залежить від величини  $I_{\text{наб}}$ , тому дана схема має обмеження по величині струму через вплив індуктивності розсіювання.

На рис.3.5 зображено часові залежності струмів і напруг в ланцюгах, що пояснюють процеси в схемі випрямляча на інтервалі "комутаційної затримки".

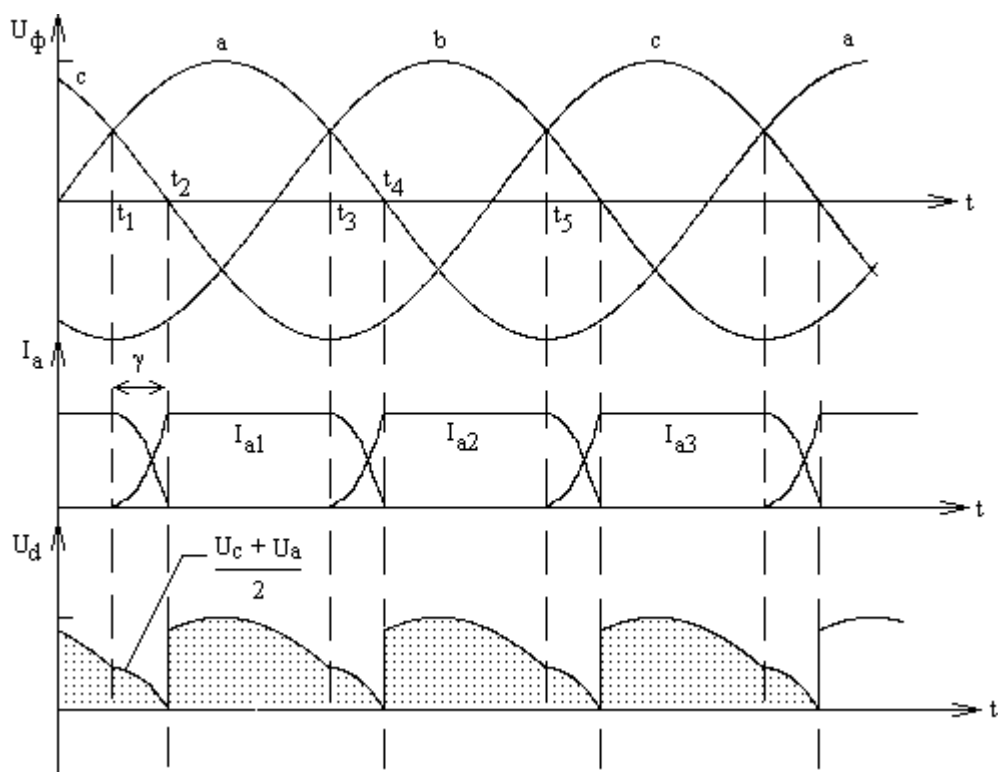


Рис.3.5. Часові залежності струмів і напруг в ланцюгах випрямляча

Тобто як видно з діаграм(рис.3.5.), в реальних системах має місце деяке зміщення імпульсів струму вентилів, що зумовлює виникнення фазного зсуву між струмом і напругою.

Для того, щоб визначитися, який тип компенсатора нам підходить більше всього, необхідно проаналізувати характер руху тролейбуса на лінії.[12]

### 3.2. Характер руху тролейбуса

Для визначення кількості ступенів регулювання реактивної потужності проаналізуємо характер руху тролейбуса №27 по м. Київ(рис.3.6.)[13]

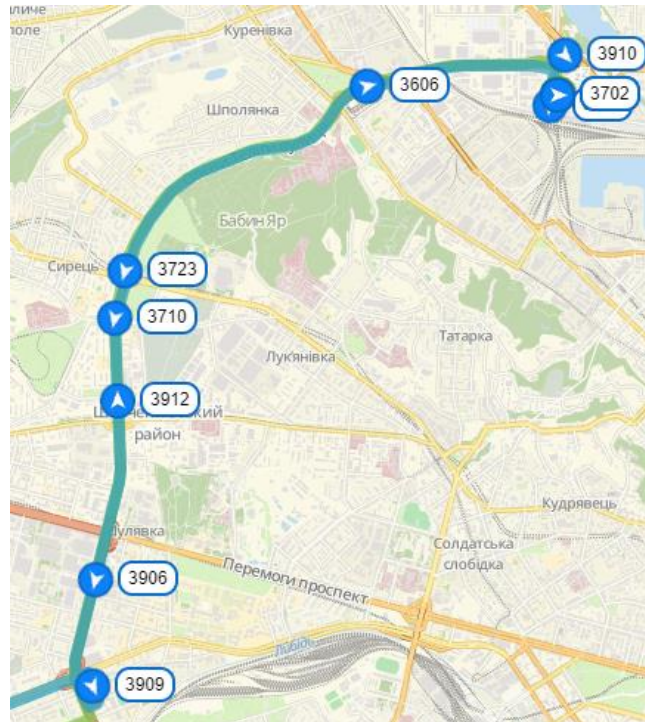


Рис.3.6. Характер руху тролейбуса №27 м.Київ

Як видно з рисунку середня відстань між тролейбусами, що прямують в напрямку м.Почайна(3909, 3912,3606,3910, 3702) становить:

$$S_T = \frac{\sum_{i=1}^{i=4} s_i}{4} = \frac{7.8 \text{ км}}{4} = 1.95 \text{ км}. \quad (3.1)$$

Тепер знайдемо середню відстань між тяговими підстанціями. Використовуючи [14] , можна сказати що середня відстань між підстанціями(1.182-1.179, 1.168-1.166, 1.135-1.129) буде рівною:

$$S_{II} = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} s_i}{10} = \frac{20.4 \text{ км}}{10} = 2.04 \text{ км}. \quad (3.2)$$

Таким чином маємо, що на лінії однієї підстанції 95% часу буде знаходитись лише один тролейбус.

Розглянемо характер руху троллейбуса від зупинки до зупинки.  
Враховуючи середню відстань до зупинки:

$$S_3 = \frac{\sum_{i=1}^{i=10} s_i}{10} = \frac{9.95 \text{ км}}{10} = 1 \text{ км}. \quad (3.3)$$

Також згідно даним [13], маємо що середня швидкість становить 40 км/год = 11.11 м/с, а прискорення від початку розгону 1.2 м/с. Знайдемо шлях розгону і зупинки

$$L_p = L_3 = \frac{at^2}{2}, \quad (3.4)$$

так як  $V = at; t = \frac{V}{a}. \quad (3.5)$

$$L_p = L_3 = \frac{V^2}{2a} = \frac{123.43}{2.4} = 51.429 \text{ м}. \quad (3.6)$$

Таким чином циклограма руху троллейбуса матиме вигляд(рис.3.7.)

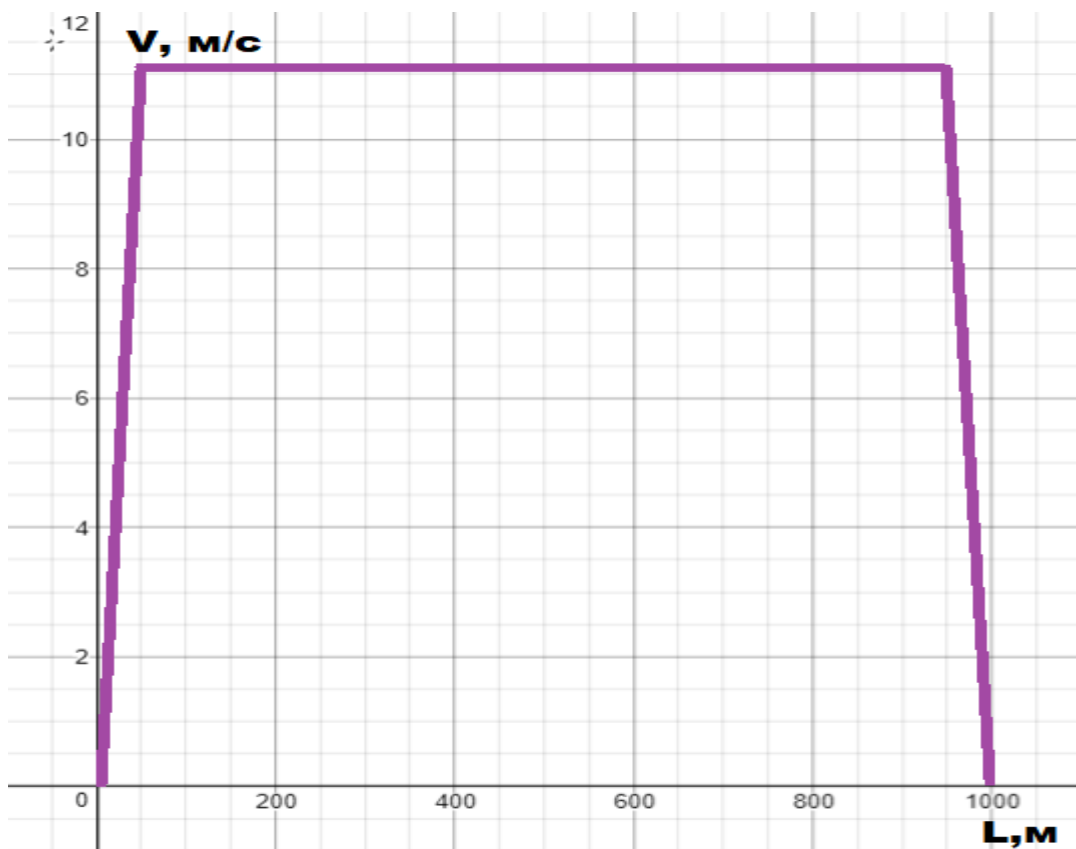


Рис.3.7 Циклограма руху троллейбуса



Як можна бачити з розрахунків та циклограми руху, тролейбус рухається 90% шляху на маршруті з постійною швидкістю. Тому можна вважати, що коли тролейбус на лінії – повсякчас споживається деяка потужність  $P_{ном}$ .

Також необхідно відмітити, що на лінії не буде навантаження з 01<sup>00</sup> до 05<sup>30</sup> згідно даних, наведених у [15]. Таким чином підстанція відпрацьовує лише близько 81% доби. Тому це необхідно враховувати при розрахунку параметрів компенсатора.

Враховуючи що імовірність появи другого тролейбуса на лінії становить лише 0.05, то використання більш ніж одного ступеня регулювання реактивної потужності можна вважати недоцільним.

Таким чином маємо два режими роботи:

- режим холостого ходу (тролейбуса немає на лінії)
- робочий режим (на лінії один тролейбус)

Оберемо принципову схему компенсатора.

### **3.3. Оцінка основних параметрів ТП**

На тягових підстанціях використовують напівпровідникові кремнієві випрямлячі, що утворюють разом з силовим трансформатором перетворювальний агрегат. Промисловість випускає випрямлячі БВКЛЕ-1000/600Н та ВАКЛЕ-2000/600Н. ВАКЛЕ-2000/600Н складається з двох випрямлячів БВКЛЕ-1000/600Н. Для вказаних випрямлячів використовують силові перетворювальні трансформатори ТМПУ-1000 і ТМПУ-2000.

Випрямляч БВКЛЕ-1000/600Н випускається на номінальну випрямлену напругу 600 В при номінальному випрямленому струмі порядку 1000 А. Він комплектується з трансформатором ТМПУ-1000 з номінальною потужністю 685кВА. Випрямляч ВАКЛЕ-2000/600Н при тій самій напрузі має номінальний струм 2000А і постачається з трансформатором ТМПУ-2000 потужністю 1385 кВА.

Випрямлячі мають природну вентиляцію. Блок випрямлення на 1000А складається з шести вентиляних плечей, кожне з яких має два паралельні ланцюжки лавинних вентилів ВЛ200.[16]

В табл. 3.3 наведено основні параметри комплекту силового трансформатора та випрямляча [17].

Для оцінки кута комутації спершу треба вирахувати індуктивність розсіювання даного трансформатора [17]:

$$L_s = \frac{U_k U_n}{I_n \omega 100} = \frac{565 \times 5.6}{289 \times 2\pi \times 50 \times 100} = 0.3 \text{ мГн}. \quad (3.7)$$

При цьому кут комутації згідно [6]:

$$1 - \cos \gamma = \frac{2I_d \omega L_s}{\sqrt{3}E_{2m}}, \quad (3.8)$$

$$\gamma = \arccos(0.9650) = 0.2653 \text{ рад} = 15.2^\circ. \quad (3.9)$$

Таблиця 3.3.

Параметри перетворювачів діючих ТП

<b>Параметри перетворювальних трансформаторів тролейбуса і трамвая</b>		
Тип трансформатора	ТМПУ-1000	ТМПУ-2000
Номін. потужність, кВА	692	1385
Струм вент. обмотки, А	289	577
Напруга вент. обмотки, А	565	565
Напруга КЗ, %	5.6	6.6
Навантаж. втрати, кВт	10.0	16.9
Втрати ХХ, кВт	3.3	3.88
Струм ХХ, %	2.0	1.3
Номін. випр. струм, А	1000	2000
Номін. випр. напруга, В	600	600
Тип випрямляча	Зірка-дві звор. зірки з УР-1 пер. секція	Зірка-дві звор. зірки з УР-2 пер. секція
Випрямляч	ВАКЛЕ-1000/600н	ВАКЛЕ-2000/600н
Перетвор. секція	БВКЛЕ-1000/600н	БВКЛЕ-1000/600н
Випрямний блок	6 вент. плечей: а=2 s=3 ВЛ-200	6 вент. плечей: а=2 s=3
Перевантажувальна здібність	125% - 15хв 200% - 10с	

### 3.4. Підключення компенсатора до кола ТП

Так як, реактивна потужність, яку необхідно компенсувати з'являється через неідеальність трансформатора, а саме через індуктивність розсіювання цього трансформатора, то для зменшення навантаження мережі, компенсатор доцільно встановлювати поблизу місця виникнення РП.

Враховуючи вищесказане можна виділити два основних типи підключення компенсатора до вузла тягової підстанції:

- «до понижувального трансформатора»;
- «після понижувального трансформатора».

Варіанти підключення показано на рис. 3.8.

Основною перевагою підключення компенсатора на високовольтній шині дозволяє серйозно не втручатися у вузол тягової підстанції, що значно здешевить монтаж подібного роду пристроїв. Проте такий тип підключення зумовлює втрату генерованої РП (близько 10% )всередині неідеального трансформатора. На відміну від високовольтної шини, підключення компенсатора після понижувального трансформатора забезпечує відсутність втрат РП всередині трансформатора, але такий тип підключення вимагає втручання у вузол тягової підстанції, що в свою чергу ускладнює монтаж пристрою компенсації. [18]

Крім того, встановлення компенсатора на стороні контактної мережі(низьковольтна шина) зменшує вимоги до компонентів пристрою, адже тут фігурують значно менші напруги. А це в свою чергу веде до зменшення вартості готового проекту.

Таким чином встановлення компенсатора реактивної потужності на стороні контактної мережі можна вважати найбільш доцільним для тягової підстанції тролейбусного підприємства.

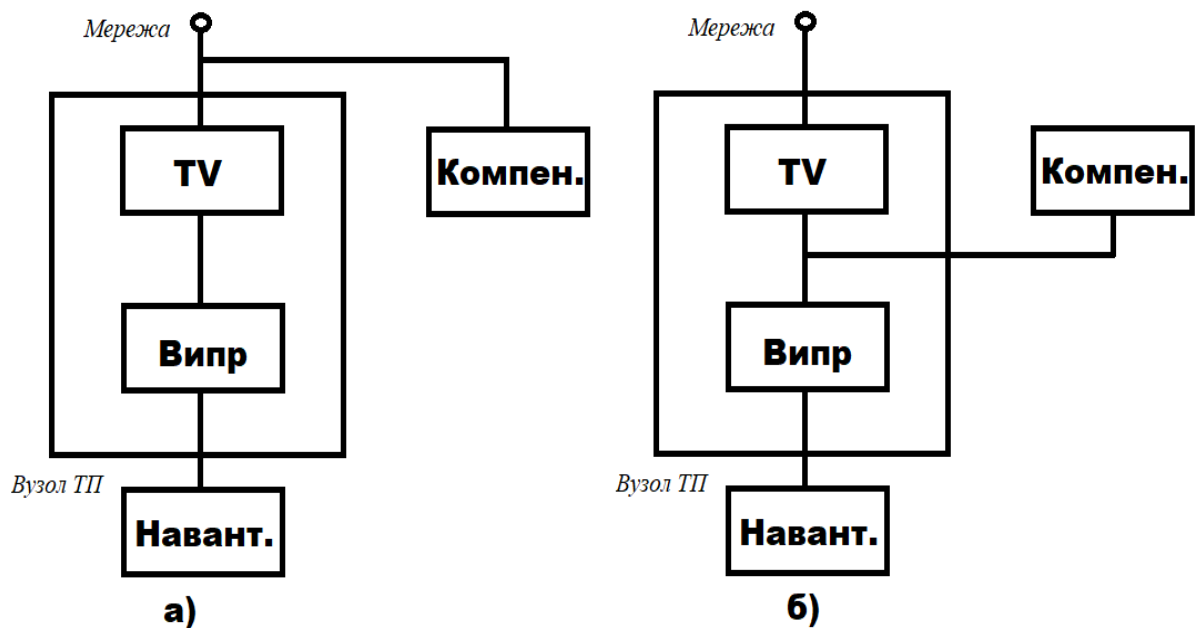


Рис.3.8. Варіанти підключення компенсатора а) до- б) після- понижувального трансформатора

### Висновки до третього розділу

Аналізуючи вищесказане, ідеалізовану модель тягової підстанції можна представити у вигляді схеми Ларіонова(трифазний мостовий випрямляч на активно-індуктивне навантаження). Розглядаючи процеси в схемі було визначено кут комутації неідеальних вентилів. Також враховуючи характер руху тролейбуса на лінії обираємо компенсатор з одним ступенем регулювання. Враховуючи, що частина генерованої потужності буде втрачатися всередині трансформатора підключаємо компенсатор безпосередньо у вузлі тягової підстанції, після понижувального трансформатора. Розрахунок елементів схеми наведено в наступному розділі.

## 4. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

### 4.1. Визначення теоретичного значення $\cos \varphi$

Розглянемо струм та напругу однієї фази(рис. 4.1.) [11].

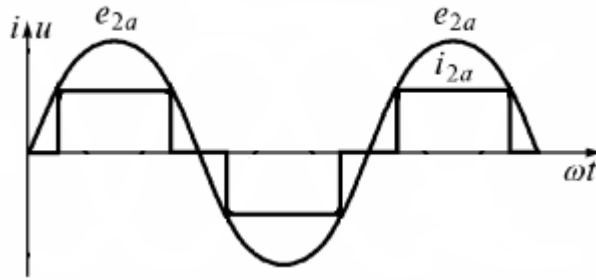


Рис.4.1. Струм та напруга однієї з фаз випрямляча

Знаючи, що коефіцієнт потужності розраховується за формулою[6]:

$$\chi = \frac{I_{1\phi}}{I_{\phi}} \cos \varphi, \quad (4.1)$$

де  $I_1$ - амплітуда першої гармоніки струму,  $I_d$  – діюче значення струму,  $\cos \varphi = 1$ . Крім того за такої форми імпульсу будуть відсутні гармоніки струму кратні 3 і парні гармоніки(так як функція непарна).

Тоді

$$I_{\phi} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} i^2 dt} = \sqrt{\frac{2\pi}{3\pi} i_{2a}^2} = i_{2a} \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (4.2)$$

В свою чергу  $I_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = |b_1|$  - так як функція непарна

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i(t) \sin(\omega t) dt, \quad (4.3)$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} i_{2a} \sin(\omega t) dt. \quad (4.4)$$

Так як  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 1$  ,

$$b_1 = \frac{2i_{2a}}{\pi\omega} \cos \frac{\pi\omega}{6} = \frac{\sqrt{3}i_{2a}}{\pi}. \quad (4.5)$$

Таким чином:

$$I_{10} = \frac{\sqrt{3}i_{2a}}{\sqrt{2}\pi}. \quad (4.6)$$

Отримаємо, що коефіцієнт потужності буде рівним:

$$\chi_1 = \frac{\sqrt{3}i_{2a}}{0.8165\sqrt{2}\pi i_{2a}} \times 1 = 0.48. \quad (4.7)$$

З іншого боку коефіцієнт потужності можна знайти як:

$$\chi_2 = \frac{P}{S}, \quad (4.8)$$

де  $P$  – активна потужність,  $S$  – повна потужність.[7]

За вихідними даними до роботи маємо, що середньодобове споживання становить 5032 кВт\*год. Тобто 209.67 кВт – це повна потужність. Також за вихідними даними середня реактивна потужність становить 158кВАр.

Таким чином:

$$\chi_2 = \frac{\sqrt{S^2 - Q^2}}{S^2} = \frac{99.64}{209.67} = 0.475. \quad (4.9)$$

Звідси знайдемо косинус кута зсуву фаз між струмом та напругою:

$$\cos \varphi = \frac{\chi_2}{\chi_1} = 8.1^\circ. \quad (4.10)$$

Тоді кут комутації буде рівним:

$$\gamma = 2\varphi = 16.2^\circ. \quad (4.11)$$

Таким чином по результатам п.3.3. та п.4.1. маємо, що в реальних тягових підстанціях кут комутації становить порядку  $16.2^\circ$ , а  $\cos \varphi \approx 7-8^\circ$ .

Звідси робимо висновок, що зменшення коефіцієнту потужності більшим чином виникає за рахунок впливу вищих гармонік струму, які необхідно подавляти.

## 4.2. Структура компенсатора

Враховуючи вищесказане, актуальною схемою для компенсації реактивної потужності для тягової підстанції буде та, що зображена на рис. 4.2.

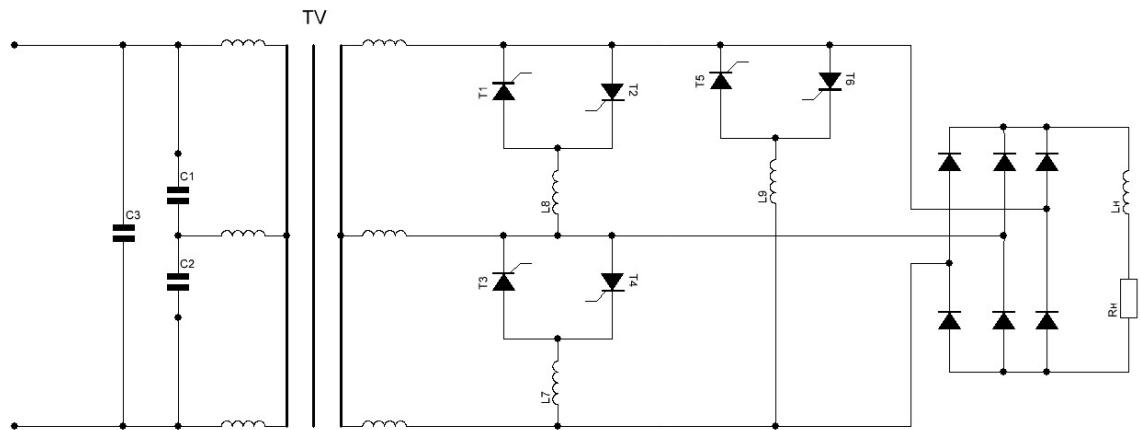


Рис.4.2.Принципова схема силової частини компенсатора та блоку ТП.

Як відомо з попередніх розділів в наведеній схемі за рахунок індуктивності розсіювання трансформатора TV виникає деякий кут комутації вентилів D1-D6. Але цей кут комутації дуже малий(порядку  $15^\circ$ ), тому недоцільно встановлювати елементи для компенсації цього зсуву фаз. З попередніх розділів також відомо, що на лінії є моменти часу без навантаження, тобто коли тролейбуса немає. Таким чином існує режим холостого ходу, що характеризується певним значенням струму холостого ходу  $I_{xx}$ . Саме для компенсації цього струму на високовольтній стороні ТП встановлюємо конденсатори C1-C3.

Крім цього блоки реакторів L7-L9 виконують функцію генерації реактивної потужності протилежного знаку, коли в системі необхідно компенсувати меншу величину ніж  $Q_{сер}$ . Тиристорні пари T1-T2/T3-T4/T5-T6 призначені для керування реакторними блоками.

За такої схеми (рис. 4.2) маємо досить низький коефіцієнт потужності (порядку 0.48). Тому можна зробити висновок, що найбільший вклад в

зниження коефіцієнту потужності вносять вищі гармоніки струму, з якими необхідно боротися.

#### 4.3. Розрахунок основних елементів компенсатора

Конденсатори С1-С3 розрахуємо, знаючи струм холостого ходу(див табл.3.3). При цьому варто зазначити, що вони рівні через симетрію схеми[19]:

$$C_{1,2,3} = \frac{Q_{сер}}{2\pi f U_{1л}^2} = \frac{U_{1л} I_{xx}}{2\pi f U_{1л}^2} = \frac{I_{xx}}{2\pi f U_{1л}} = 30.63 \text{ мкФ}. \quad (4.12)$$

В якості ємностей С1-С3 оберемо конденсатори КЭП(КЭК)3-6,3-400-2У1(6.3кВ, 32.1мкФ).[20]

Розрахуємо індуктивність реакторних блоків за формулою з [19]:

$$Q_{сер} = \frac{U_{2л}^2}{2\pi f L}. \quad (4.13)$$

де  $Q_{сер}$  – середнє значення реактивної потужності, що необхідно компенсувати,  $I^2$  – номінальний струм навантаження. При чому варто зазначити, що індуктивності L7-L9 рівні.

Таким чином, знаючи, що реактор працює на частоті  $f=50\text{Гц}$ , за напруги  $U_{2л}=444.444\text{В}$  і розрахований на середню реактивну потужність  $Q_{сер}=158\text{кВАр}$ , розрахуємо величину індуктивності:

$$L = \frac{U_{2л}^2}{Q_{сер} 2\pi f} = \frac{197530.469}{100\pi(1000)^2} = 0.0038\text{Гн} = 3.8\text{мГн} \quad (4.14)$$

В якості реакторів оберемо три СРОС-500/0.504 розрахованих на напругу 500В і струм 400А, з індуктивністю 7.5мГн.[21]

Тиристори Т1-Т6 вибираємо за умови максимальної зворотної напруги  $U_{2л}=444.444\text{В}$  та максимальної величини струму, що може протікати через тиристор, а отже і через індуктивність реактора:

$$I_{зв.макс.} = \frac{U_{2л}}{2\pi f L} = 372.29\text{А}. \quad (4.15)$$



Таким чином в якості тиристорів обираємо ТБ143-400, розрахованих на напругу до 2.2кВ і струм до 500А.[22]

#### 4.4. Покращення параметру коефіцієнта потужності

З огляду на попередні розділи, для покращення коефіцієнту потужності до структури компенсатора необхідно додати режекторні фільтри, що розраховані на перші значимі неосновні гармоніки, а саме 5, 7, 11(так як дана форма струму виключає наявність парних гармонік і гармонік кратних третій). Також суттєво на підвищення коефіцієнту потужності вплине встановлення додаткового фільтру низьких частот, з частотою зрізу рівній частоті 13 гармоніки.

Через неідеальність фільтрів виключається можливість використовувати лише один фільтр низьких частот на частоті зрізу 5-ї гармоніки. Адже ФНЧ такого типу має пологоу характеристику АЧХ, що спричиняє зменшення коефіцієнту передачі фільтру до значень менших за 1 на частотах 1-ї гармоніки струму. Таким чином відбувається подавлення 1-ї гармоніки, що в реальних системах веде до зменшення ККД пристрою.

Розрахуємо, як впливають на величину коефіцієнта потужності встановлення фільтрів вищих гармонік (5, 7, 11).

Аналогічно розрахуємо амплітуди вищих гармонік:

$$I_5 = \sqrt{a_5^2 + b_5^2} = |b_5|, \quad (4.16)$$

$$b_5 = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} i_{2a} \sin(5\omega t) dt. \quad (4.17)$$

$$I_5 = \frac{\sqrt{3}i_{2a}}{5\pi}, \quad (4.18)$$

$$b_7 = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} i_{2a} \sin(7\omega t) dt. \quad (4.19)$$

$$I_7 = \frac{\sqrt{3}i_{2a}}{7\pi}. \quad (4.20)$$

Аналогічно для вищих гармонік:  $I_n = \frac{\sqrt{3}i_{2a}}{n\pi}$ , де  $n=11, 13, 17$

$$I'_\delta = \sqrt{(I_\delta)^2 - \frac{I_5^2}{2} - \frac{I_7^2}{2} - \frac{I_{11}^2}{2}} =$$

$$= i_{2a} \sqrt{\frac{2}{3} - (0.1103)^2 - (0.0788)^2 - (0.0501)^2} = 0,8101i_{2a} \quad (4.21)$$

$$I_\delta = i_{2a} \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.8165i_{2a}. \quad (4.22)$$

Як бачимо перші наявні гармоніки струму мало впливають на величину діючого значення струму, а отже і на коефіцієнт потужності. [23]

Розрахуємо, як впливає фільтр низьких частот на величину коефіцієнта потужності. Будемо використовувати звичайний Г-подібний LC-ланцюжок(рис. 4.3).

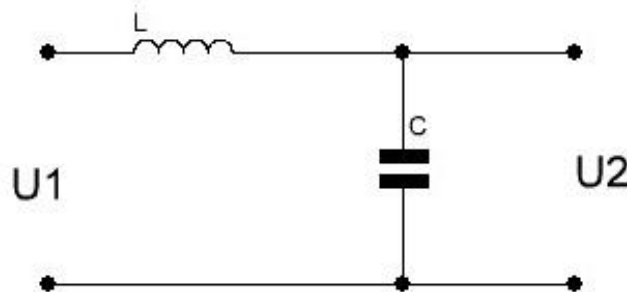


Рис.4.3.Г-подібний LC фільтр низьких частот.

Як було визначено раніше, ФНЧ будемо розраховувати для частоти зрізу, що рівна частоті 13 гармоніки.

В якості ємнісних елементів будемо використовувати вже наявні конденсатори ємністю  $C = 2.55 \text{ мФ}$ .

Розрахуємо величину індуктивності LC-ланцюжка[24]:

$$f_3 = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}. \quad (4.23)$$

$$L = \frac{1}{C\pi^2 f_3^2} = 94.04 \text{ мкГн}. \quad (4.24)$$

Для визначення впливу фільтрації на величину амплітуд вищих гармонік, розрахуємо коефіцієнт передачі.

Для фільтра, наведеного на рис.4.3 він буде рівним:

$$\dot{K}_u = \frac{\dot{X}_c}{\dot{X}_c + \dot{X}_L} = \frac{1}{1 + \frac{\dot{X}_L}{\dot{X}_c}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC}, \quad (4.25)$$

$$K(\omega) = \left| \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \right|. \quad (4.26)$$

Таким чином на частоті зрізу  $K(\omega)$  буде рівним 0.707, а на вищих частотах  $K(\omega)$  буде прямувати до 0.

Враховуючи викладене вище, можна стверджувати, що теоретично діюче значення струму першої гармоніки буде рівним діючому значенню струму в цілому. Тоді коефіцієнт потужності буде рівним 1. Однак в реальних системах неможливо повністю придушити вищі гармоніки, тому коефіцієнт потужності буде порядку[8]:

$$\chi_3 = \frac{I_{1\phi}}{I_\phi''} \cos \varphi = \frac{I_{1\phi}}{\sqrt{\left(I_\phi'\right)^2 - \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=13}^{\infty} I_n^2 K(n\omega_0)}} = 0.83, \quad (4.27)$$

де  $I_n^2$  - квадрат амплітуди n-ї гармоніки,  $K(n\omega_0)$  - коефіцієнт передачі фільтра на n-й гармоніці.

Як бачимо, подавлення вищих гармонік струму позитивно впливає на величину коефіцієнту потужності. Так як коефіцієнт потужності можна розрахувати за формулою (4.9), то виходить що при споживанні тієї ж частки активної потужності повна потужність зменшується до величини:

$$S' = \frac{\chi_2}{\chi_3} S = 117.023 \text{ Вт}. \quad (4.28)$$

Тоді середньодобове споживання потужності буде рівним 2809кВт\*год.

При тарифі 140коп./кВт\*год маємо 3932.6грн замість звичайних 7044.8грн за добу. Якщо брати місяць з середньою кількістю днів 30, то отримаємо економію в

$$E = (P_1 - P_2) \times 30 = 93366 \text{ грн}. \quad (4.29)$$

#### 4.5. Розрахунок параметрів фільтрів

В попередньому пункті було розраховано індуктивність фільтру низьких частот на базі Г-подібного LC ланцюжка. Варто зазначити, що такий ФНЧ буде встановлено на кожен фазу трьохфазної системи.

В якості ємностей оберемо батарею з 5 конденсаторів КЭПП-0,66-80 УХЛ1 розрахованих на напругу 0.66кВ ємністю 585мкФ

В якості індуктивностей оберемо дросель АСР-0200 200А 400В

В якості режекторних фільтрів на вищі гармоніки будемо використовувати Г-подібні LC фільтри(рис.4.4).[25]

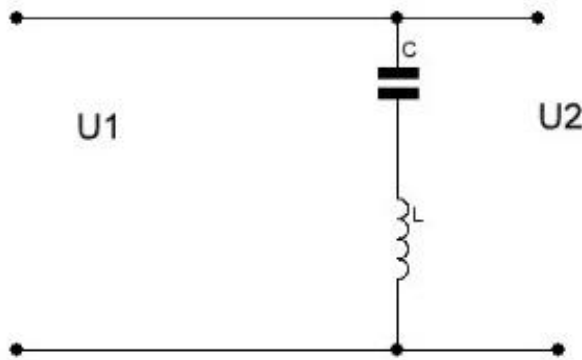


Рис.4.4. Режекторний LC фільтр

Розрахуємо характеристики режекторного фільтру на 5-у гармоніку струму.

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = 3.5. \quad (4.30)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4.31)$$

$$\text{Звідси} \quad f_0 = \frac{1}{7\pi C^2}. \quad (4.32)$$

$$C = \sqrt{\frac{1}{3,5\omega_0}} = 13,5 \text{ мФ}. \quad (4.33)$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = 30 \text{ мкГн}, \quad (4.34)$$

де  $\omega_0$  - кутова частота 5-ї гармоніки.

Аналогічно для 7-ї гармоніки:

$$C = \sqrt{\frac{1}{3,5\omega_0}} = 11,4 \text{ мФ} \quad (4.35)$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = 18,14 \text{ мкГн} \quad (4.36)$$

де  $\omega_0$  - кутова частота 7-ї гармоніки.

Точно такий же розрахунок для фільтру 11 гармоніки:

$$C = \sqrt{\frac{1}{3,5\omega_0}} = 9,1 \text{ мФ}. \quad (4.37)$$

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = 9,2 \text{ мкГн}, \quad (4.38)$$

де  $\omega_0$  - кутова частота 11-ї гармоніки.

Таким чином виберемо:

- для фільтра 5-ї гармоніки - OCL-0200 200А 400В на 35мкФ в якості індуктивності, батарею з двох ФПС-1-600 У2 600мкФ до 400Гц, 750В
- для фільтра 7-ї гармоніки - OCL-0200 200А 400В на 18мкФ в якості індуктивності, батарею з двох ФПС-1-600 У2 600мкФ до 400Гц, 750В
- для фільтра 11-ї гармоніки - OCL-0200 200А 400В на 11мкФ в якості індуктивності, батарею з двох ФПС-1-600 У2 600мкФ і 300мкФ до 400Гц, 750В[20],[21]

Враховуючи сказане вище, принципова схема силової частини компенсатора представлена в додатку А

#### 4.6. Методи керування тиристором

У найпростішому випадку, для управління тиристором досить короткочасно подати постійний струм певної величини на його керуючий електрод. Схематично механізм подачі цього струму можна показати, зобразивши ключ, який замикається і подає живлення, подібно вихідного каскаду мікросхеми або транзистору.

Це простий на вигляд спосіб, проте потужність сигналу потрібно тут чимала. Так, в нормальних умовах для тиристора ТС-142-80-12 (рис.4.5) цей струм повинен становити мінімум 160 мА. Таким чином, для напруги 12 вольт і при середньому струмі, скажімо, в 115 мА, потужність управління вже складе 1,4 Вт.



Рис.4.5. Тиристор ТС-142-80-12

Ключ SA1 на рис.5.1 і на наступних малюнках - це будь-який елемент, що забезпечує замикання ланцюга: транзистор, вихідний каскад мікросхеми, оптрон і ін.

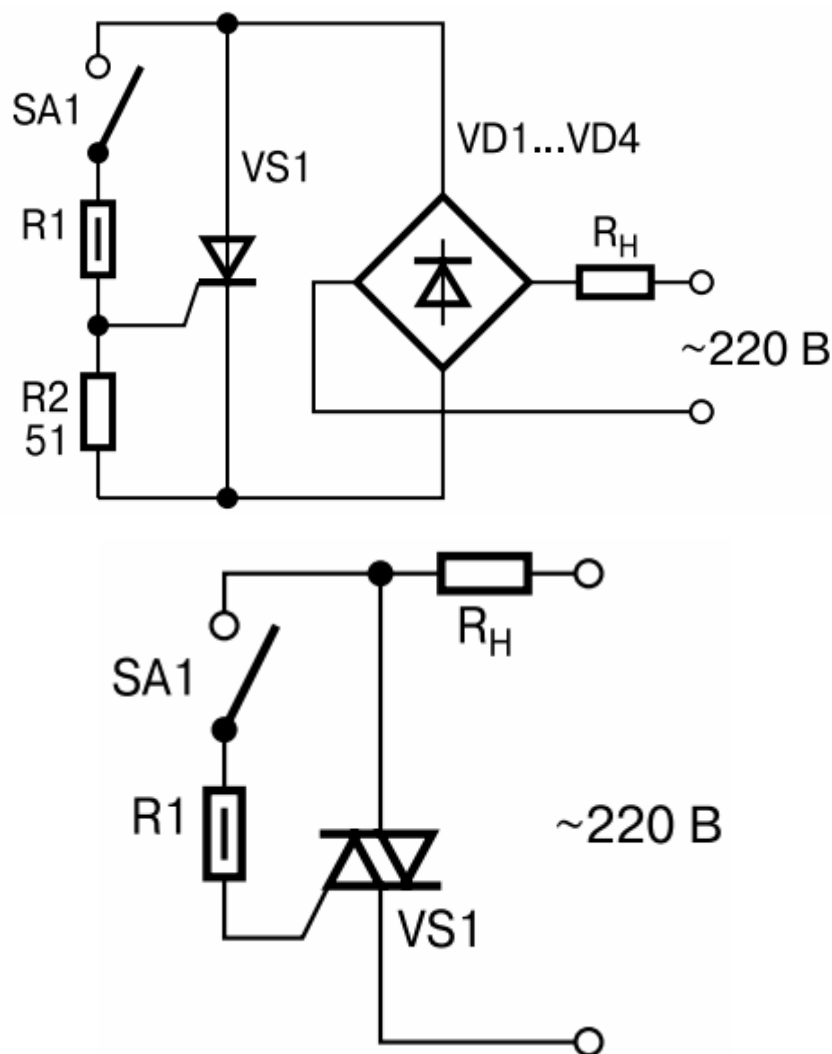


Рис.4.6. Схеми комутації тиристора/симістора

Відзначимо, що полярність керуючої напруги для тиристорів- або негативна для обох напівперіодів, або збігається з полярністю напруги на аноді. Також можна додати, що часто відповідно до вказівок щодо застосування, потрібне шунтування керуючого переходу тиристорів опором 51Ом (R2 на рис. 4.6) і не потрібно ніякого шунтування для симісторів.

Реальні величини струму керуючого електрода, достатнього для включення тиристора, зазвичай менше табличних цифр, тому нерідко йдуть на його зниження щодо гарантованих значень: для тиристорів - до 7-40 мА, для симісторів - до 50-60 мА.

Таке зниження часто призводить до ненадійної роботи пристроїв, і необхідність попередньої перевірки або ж підбору тиристорів. Зменшення керуючого струму також може призводити до виникнення перешкод

радіотрансляції, оскільки включення тиристорів при малих струмах керуючого електрода відбувається при відносно великій напрузі на аноді - кілька десятків вольт, що призводить до стрибків струму через навантаження і, отже, до потужних перешкод.

Недоліком управління тиристорами постійного струму є гальванічний зв'язок джерела сигналу і мережі. Якщо в схемі з симістором (рис.4.6) при відповідному включенні мережевих дротів джерело сигналу можна з'єднати з нульовим проводом, то при використанні тиристора така можливість виникає лише при виключенні випрямного моста VD1-VD4. Останнє призводить до однонапівперіодної подачі напруги на навантаження і дворазового зменшення потужності, що поступає в нього.

В даний час у зв'язку з великою споживаною потужністю запуск тиристорів постійного струму при безтрансформаторному живленні пускових вузлів (з резистором або конденсатором) практично не використовується.

Оскільки час включення типових тиристорів становить 10мкс і менше, можна подавати на їх керуючий електрод імпульси такої ж тривалості з скважністю, наприклад, 5-10-20, що відповідає частоті 20-10-5кГц. В цьому випадку споживана потужність також зменшується в 5-10-20 раз відповідно. Однак при такому способі управління виявляються деякі нові недоліки. По-перше, тепер тиристор включається не на самому початку напівперіоду мережевої напруги, а в довільні моменти часу, віддалені від початку напівперіоду на час, що не перевищує період пускових імпульсів 50-100-200мкс. За цей час напруга мережі може зрости приблизно до 5-10-20 В.

Це призводить до виникнення перешкод радіотрансляції і до деякого зменшення вихідної напруги, втім, малопомітним. Існує ще одна проблема. Якщо при включенні на початку напівперіоду під час дії пускових імпульсу струм через тиристор не досягне струму утримання, тиристор після закінчення імпульсу вимкнеться. Наступний імпульс знову включить тиристор, і він не вимкнеться лише в тому випадку, якщо до моменту закінчення імпульсу струм через нього буде більшим за струм утримання. Таким чином, струм через



навантаження спочатку буде мати вигляд кількох коротких імпульсів і лише потім - синусоїдальну форму.

Якщо ж навантаження має активно-індуктивний характер (наприклад, електродвигун), струм через нього за час дії короткого імпульсу може не встигнути досягти величини струму утримання, навіть коли миттєва напруга в мережі максимальна. Тиристор після закінчення кожного імпульсу буде вимикатися. Цей недолік обмежує знизу тривалість пускових імпульсів і може звести нанівець зменшення споживаної потужності.

Застосування імпульсного запуску полегшує гальванічну розв'язку між вузлом управління мережею, бо її може забезпечити навіть невеликий трансформатор з коефіцієнтом трансформації, близьким до 1: 1. Його зазвичай намотують на феритових кільцях діаметром 16-20 мм з ретельно виконаною ізоляцією між обмотками. Слід застерегти від застосування малогабаритних імпульсних трансформаторів промислового виготовлення. Як правило, вони мають низьку напругу ізоляції (близько 50-100 В) і можуть служити причиною ураження електричним струмом, якщо при використанні приладу буде вважатися, що ланцюг управління ізольований від мережі.

Зниження необхідної при імпульсному управлінні потужності і можливість введення гальванічної розв'язки дозволяють застосувати в вузлах управління тиристорами безтрансформаторне живлення. Третій широко поширений спосіб управління тиристорами - подача на керуючий електрод сигналу з його анода через ключ і обмежувальний резистор (рис.4.7). В такому вузлі струм через ключ протікає протягом декількох мікросекунд, поки включається тиристор, якщо напруга на аноді досить велика. Як ключі використовують малопотужні електромагнітні реле, високовольтні біполярні транзистори, фотодіністори або фотосимістори (схеми на рис.4.7 відповідно).

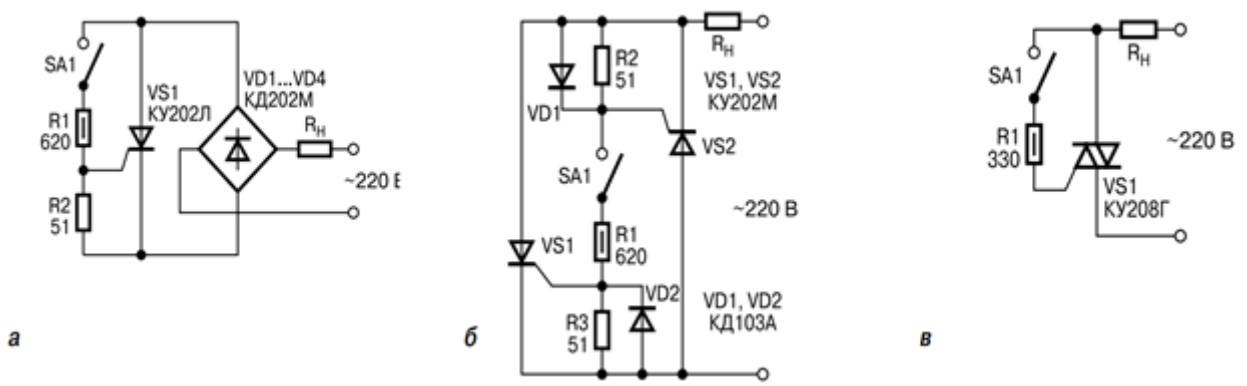


Рис.4.7. Схеми керування через обмежувальний резистор

Недолік пов'язаний з суперечливістю вимог до обмежувального резистору  $R_1$ . З одного боку, його опір має бути якомога меншим, щоб включення тиристора відбувалося якомога ближче до початку напівперіоду мережевої напруги. З іншого боку, при першому відкриванні ключа, якщо він не синхронізований з моментом проходження мережевої напруги через нуль, напруга на резисторі  $R_1$  може досягати амплітудної напруги мережі, тобто складати 310-350 В.

Імпульс струму через цей резистор не повинен перевищувати допустимих значень для ключа і керуючого переходу тиристора.

Виходячи зі значень максимально допустимого імпульсного струму управління і максимального імпульсного струму через ключ, можна для кожної конкретної пари приладів визначити мінімально допустимий опір обмежувального резистора. Наприклад, для пари КУ208Г ( $I_y$ , ввімкн.макс=1 А) і АОУ160А ( $I_{\text{макс}}$ , імп=2А) можна вибрати  $R_1 = 330 \text{ Ом}$ . Якщо струм керуючого електрода, при якому відбувається включення симістора, відповідає його максимальному значенню 160мА, симістор буде включатися при напрузі на аноді рівному  $0,16 \cdot 330 = 53 \text{ В}$ . Як і у випадку з подачею керуючих імпульсів великої скважності, це призводить до виникнення перешкод і до деякого зменшення вихідної напруги. Оскільки реальна чутливість тиристорів по керуючому електроду зазвичай краще, затримка

відкривання тиристора щодо початку напівперіоду менше розрахованої вище граничної величини.[26]

#### **4.7. Принципова схема системи керування**

Для керування комутацією реакторних блоків в системах компенсації реактивної потужності найчастіше використовують тиристорні/симісторні регулятори, що працюють на змінному струмі.

У разі роботи навантаження на постійній напрузі застосовують широтноімпульсну модуляцію (ШІМ), і змінюючи скважність відповідно змінюють і потужність, що подається на навантаження.

Якщо використовувати керування за допомогою ШІМ для регулювання потужності в мережі змінного струму, ключ через який регулюємо сигнал (наприклад симістор) буде відкриватися і пропускати в навантаження частини синусоїди, що мають різну потужність. В результаті плавного регулювання не вийде, а буде невпорядкований сигнал на виході. Виділяють два основних види регуляторів потужності в мережі змінного струму, кожен з яких має свої плюси і недоліки.

Багатотиристорні регулятори потужності використовують принцип фазового управління. Принцип роботи таких регуляторів заснований на зміні моменту включення тиристора щодо переходу мережевої напруги через нуль. На малюнку 1 на верхньому графіку показана мережева напруга, а на середньому - напруга на навантаженні, підключеного до регулятора з фазовим керуванням.

З графіка видно (рис.4.8), що комутація тиристора відбувається при ненульовому значенні напруги, що викликає різку зміну струму в навантаженні, і, як наслідок, високий рівень завад. Такі регулятори повинні мати в своєму складі LC-фільтри.

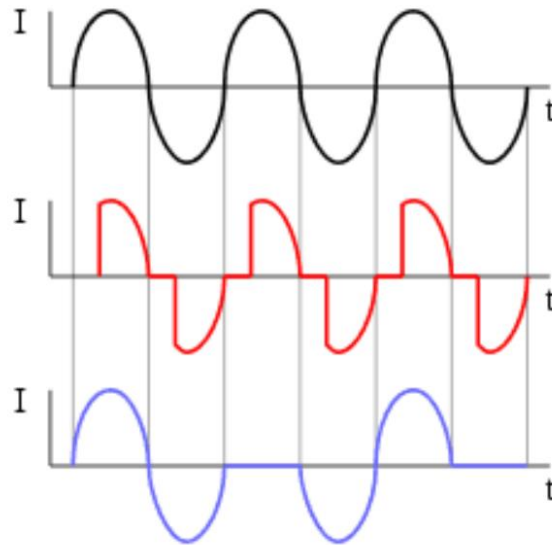


Рис.4.8 Графіки напруги

Існує інший метод регулювання потужності, заснований на принципі подачі на навантаження декількох напівперіодів мережевої напруги з наступною паузою (нижній графік на рис.4.8). перевагою таких регуляторів є те, що моменти комутації тиристора збігаються з моментами переходу напруги через нуль, тому рівень завад різко знижений. Застосування мікроконтролера дозволило використовувати для рівномірного розподілу імпульсів алгоритм Брезенхема. Однак у таких регуляторів є недолік - знижена частота комутації струму в навантаженні в порівнянні з фазовим керуванням. Як наслідок такі регулятори непридатні для керування лампами розжарювання, так як у них відносно низька частота комутації навантаження, що призведе до значного мерехтіння.[27]

Тому регулятор потужності, заснований на принципі пропускання частини напівперіоду краще, так як буде плавніше змінювати потужність, і відповідно його використання більш широке (універсальний). Для захисту мережі від перешкод буде використаний мережевий LC-фільтр.

Регулятор призначений для роботи з активним навантаженням, яка підключається до мережі напругою 380В (рис.4.9.).

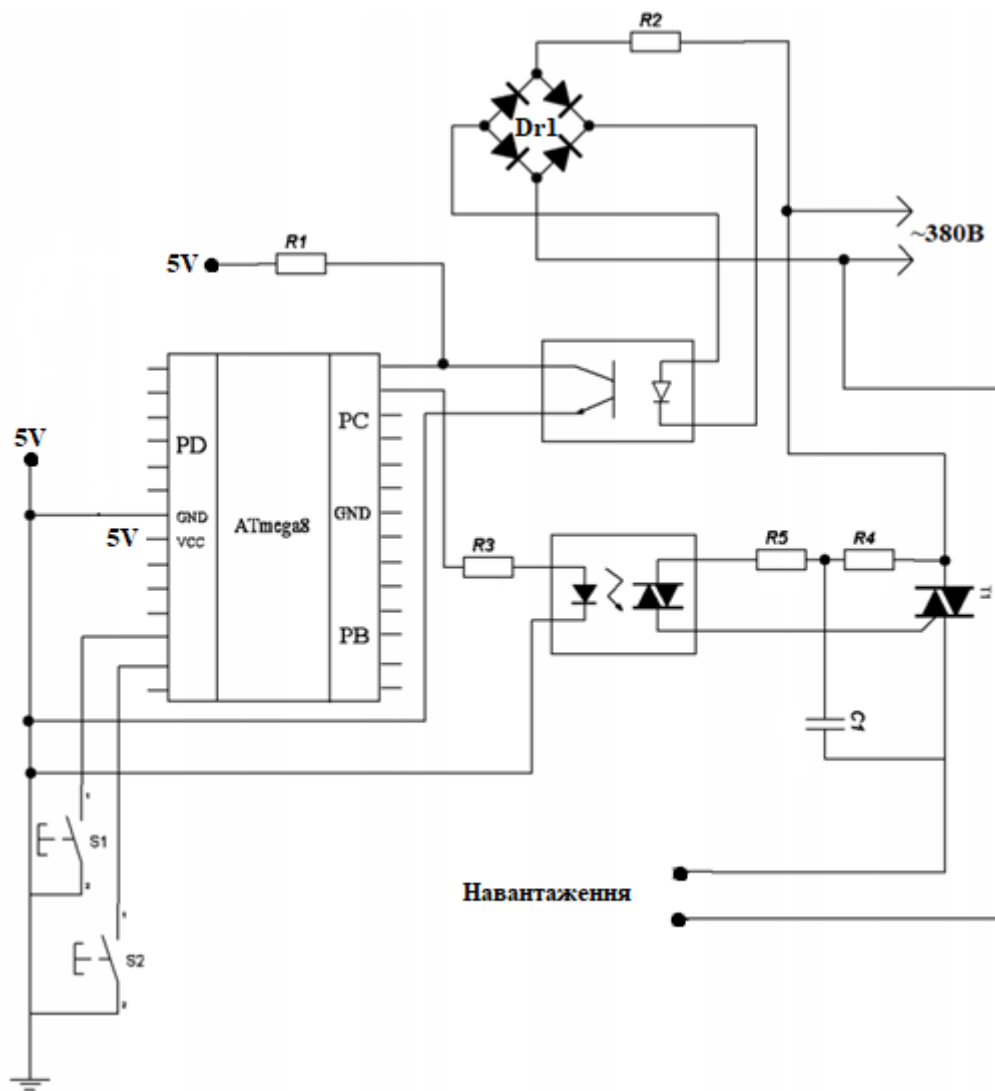


Рис.4.9. Принципова схема системи керування

Для визначення початку кожної напівхвилі (позитивної/негативної) підключаємо оптопару через діодний міст. Таким чином, на виході детектора нуля отримуємо короткі позитивні імпульси в момент, коли напруга в мережі проходить через 0. Сигнал з детектора нуля можна підключати на вхід зовнішнього переривання, щоб визначати початок нової напівхвилі, а далі відкривати симістор на необхідний час.

Змінюючи значення затримки таймера двома кнопками, що підключені до входів мікроконтролера, відповідно змінюємо затримку відкриття симістора після початку напівхвилі. Чим більше затримка, тим менша частина напівхвилі буде пропущена на навантаження і відповідно отримуємо меншу потужність.

Знаючи частоту тактування мікроконтролера, можемо підрахувати затримку. При частоті напруги 50Гц час напівперіоду складе 0,01с. Тобто, якщо ми відкриємо симістор на 0,005 с, ми пропустимо половину напівхвилі і потужність складе 50%.

Якщо відкриємо симістор без затримки, то пропустимо всю півхвилю, і вихідна потужність складе 100%. Для відмикання симістора на його керуючий електрод подається напруга через оптосимістори щодо умовного катода на час, що не перевищує залишок часу завершення періоду мережевої напруги, для того, щоб симістор встиг закритися до переходу через нуль напівхвилі. На малюнку 4 наведена електрична принципова схема регулятора.

Таймер буде працювати (тактуватися) від внутрішнього генератора імпульсів.

### **Висновки до четвертого розділу**

По результатам розрахунку кута комутації можна сказати, що зсув фаз між струмом та напругою мало впливає на величину коефіцієнта потужності. Проблему підвищення коефіцієнта потужності було вирішено встановленням трьох фільтрів на вищі гармоніки(5,7,11), а також фільтру низьких частот з частотою зрізу рівній 13 гармоніці. В розділі була представлена схема системи керування.

## 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

### **Етапи розроблення стартап-проекту**

#### *Маркетинговий аналіз стартап-проекту*

В межах цього етапу:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

#### *Організація стартап-проекту*

В межах цього етапу:

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;

- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;
- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

#### *Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту*

В межах цього етапу:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

#### *Заходи з комерціалізації проекту*

Цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції (оферти). Він передбачає:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту.



## 5.1. Опис ідеї проекту

Опис ідеї проекту наведено в табл. 5.1 [28]

Таблиця 5.1

Опис ідеї проекту		
<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Зміст ідеї: створення компенсатора реактивної потужності для тягової підстанції комунального тролейбусного підприємства;	Тяговий міський електротранспорт;	Компенсація реактивної потужності, підвищення якості електроенергії, підвищення коефіцієнта потужності, зменшення навантаження на лінії ТП, здешевлення обладнання.

В табл. 5.2. наведено сильні та слабкі сторони проекту.

Таблиця 5.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ n	Техніко-економ. хар-ки	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1.	Компенсація реактивної потужності	Повна, з можливістю регуляції величини потужності, що генерується	Компенсація дискретних значень РП	Повна, з можливістю регуляції величини потужності, що генерується	Повна, регуляція величини потужності, що генерується в широкому діапазоні значень		+	
2.	Підвищення коефіцієнту потужності	Наявне, за рахунок подавлення вищих гармонік струму	Не наявне	Наявне, за рахунок врахування індуктивності розсіювання трансформатора	Наявне, за рахунок компенсації струму холостого ходу			+
3.	Покращення гармонійного складу струму	Наявне, за рахунок подавлення вищих	Не наявне	Не наявне	Не наявне			+

		гармонік струму						
4.	Захист в аварійних режимах	Не передбачений	Наявний	Наявний	Наявний	+		

## 5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В табл. 5.3 наведено критерії технологічної здійсненності проекту.[28]

Таблиця 5.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1	Компенсація РП в колі тягової підстанції	Дослідження, розробка, реалізація	Наявна	Доступна
2	Підвищення коефіцієнту потужності	Дослідження, розробка, реалізація;	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: самостійна розробка на основі дослідження				

## 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В табл. 5.4 - 5.9 наведено попередню характеристика потенційного ринку проекту.[28]

Таблиця 5.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	100
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	15000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутність масового виробника
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25

Таблиця 5.5

## Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
Здешевлення обладнання; розвантаження промислових ЛЕП; зменшення теплових втрат в провідних елементах; підвищення коефіцієнту потужності;	Міські комунальні підприємства тягового електричного транспорту	Немає	- Дешевизна -Якість -Надійність роботи -Можливість інтеграції у свій тип ТП

Таблиця 5.6

## Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Захист від перенавантаження	Відсутність захисних елементів в умовах високої конкуренції для вузького кола споживачів	Зробити упор на вдосконалення системи захисту від перенавантажень;
2	Конкуренція		
3	Вузька цільова аудиторія		

Таблиця 5.7

## Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Гармонійний склад струму	Підвищення коефіцієнту потужності за рахунок покращення гармонійного складу струму	Зроблений упор на покращення гармонійного складу струму;
2	Коефіцієнт потужності		

Таблиця 5.8

## Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції: чиста	В кого краще - в того купують	Покращення товару та сфери обслуговування
2. За рівнем конкурентної боротьби: локальна	Належить до промислового ринку збуту;	Розширення функціоналу та орієнтації користувачів
3. За галузевою ознакою: галузева	Притаманна одній галузі застосування;	Підвищення якості, зменшення ціни
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова та товарно-видова	Належить до компенсаторів РП	Розширення функціоналу пристрою
5. За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова	Чим дешевше – тим привабливіше; Чим краще – тим рентабельніше;	Покращення цінової політики та якості товару
6. За інтенсивністю: не марочна	Не жорстка конкуренція	Агресивні та не агресивні форми піару

Таблиця 5.9

## SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Покращення гармонійного складу струму Підвищення коефіцієнту потужності	Слабкі сторони: Захист в аварійних режимах
Можливості: Покращення гармонійного складу струму Підвищення коефіцієнту потужності	Загрози: Захист від перенавантаження Конкуренція Вузька цільова аудиторія

**5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту**

В табл. 5.10-5.13 наведена розробка маркетингової програми стартап-проекту.[28]

Таблиця 5.10

## Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/ n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристик и товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентно ї поведінки*</i>
1	НІ	Буде шукати нові розширяючі функціонали і потенціал продукту, а також існуючі клієнти у конкурентів самовільно будуть використовувати більш кращий продукт	Ні, не буде, так як це зменшить клієнтську базу	Помірна, місцями агресивна

Таблиця 5.11

## Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	«Тримати руку на пульсі»; «Бути у тренді»;	Висока якість за низькою ціною	Створення надійного бренду; Постійний розвиток та апгрейд системи та компанії у всіх напрямках; Дотримуватися схеми ціна – якість;

Таблиця 5.12

## Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
	200-250% від ціни нашого продукту	180-200% від ціни нашого продукту	200000 - 600000 грн зі 100 проданих од.	15000/20000 грн

Таблиця 5.13

## Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Задоволення потреб, здешевлення систем де пристрій	Збут товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів	Усі можливі канали збуту (глибока)	Власна
2	впроваджується, економія коштів	Збут та реклама товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів	Усі можливі канали збуту (глибока)	Залучена

**Висновки до п'ятого з розділу**

Аналізуючи викладене вище проект, що розробляється має можливість на ринкову комерціалізації. Зростання попиту на схожу продукцію сприяє масовому придбання подібних пристроїв, але створює серйозні умови конкурентної боротьби при виході на ринок, де його динаміка досить м'яка до проекту, що розробляється. Проект має середні перспективи впровадження з огляду на потенційну групу клієнтів, якими виступають лише комунальні підприємства. Бар'єрами входження на ринок можуть бути відсутність масового виробництва, сильна конкуренція з боку великих фірм схожих продуктів. Але якщо вести боротьбу в конкурентному середовищі, проект має непогані шанси на реалізацію та завоювання своєї ніші на ринку. Подальша імплементація пристрою є рентабельною та актуальною.

## ВИСНОВКИ

В даній роботі було розроблено принципову схему компенсатора реактивної потужності в колі тягової підстанції. По результатам аналізу наукових джерел розглянуто причини виникнення реактивної потужності як такої, а також розглянуто переваги і недоліки основних типів компенсаторів(джерел реактивної потужності).

Після дослідження характеру роботи тягової підстанції, запропоновано її ідеалізована модель. На базі цієї моделі були досліджені процеси, що призводять до споживання реактивної потужності та розроблена принципова схема компенсатора.

За розрахунками, наведеними в роботі представлена схема дозволяє компенсувати реактивну потужність, споживану тролейбусом шляхом збільшення коефіцієнту потужності майже в 2 рази, що призводить до заощадження близько 95тис.грн за місяць при оплаті електроенергії.

Розроблена схема компенсатора може використовуватись на тягових підстанціях понижувального типу(6кВ змінної напруги - 600В постійної напруги)комунальних тролейбусних підприємств.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

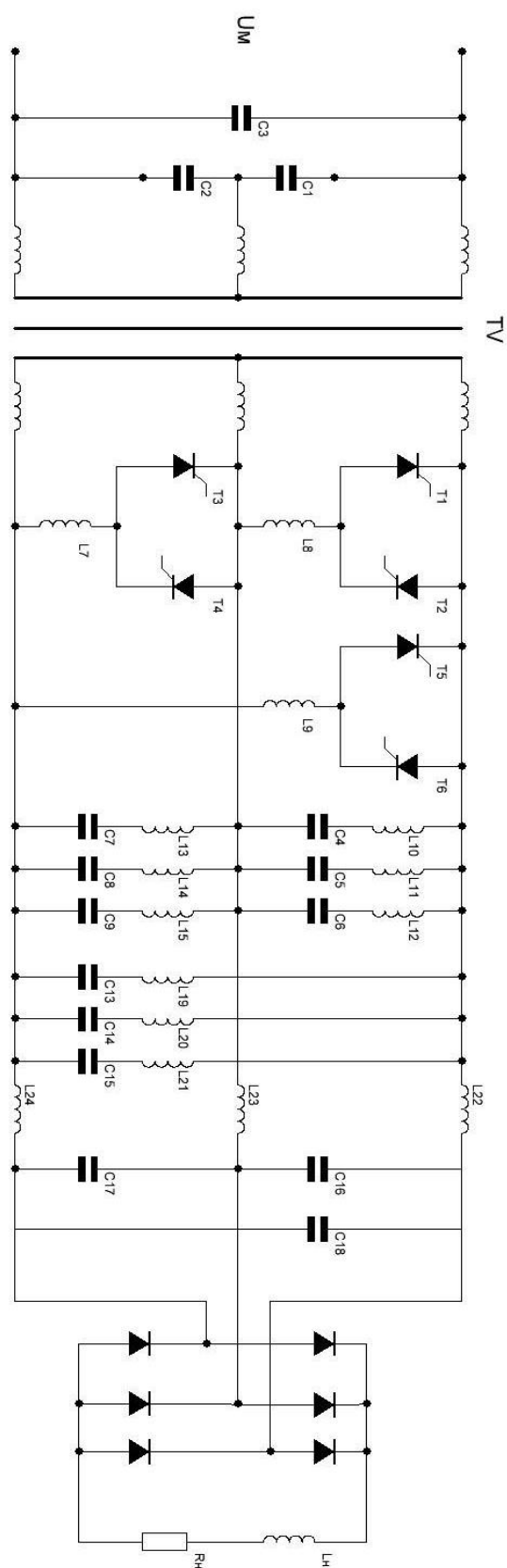
1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М: Высшая школа, 1984
2. Электроснабжение троллейбуса. Режим доступа: <http://www.matrixplus.ru/trollbus-145.htm>.
3. Константинов Б.А., Зайцев Г.З. Компенсация реактивной мощности, Москва, Энергия, 1976. — 104 с.
4. Полная мощность переменного тока. Режим доступа: <http://www.matrixplus.ru/trollbus-145.htm>.
5. Реактивная мощность в линейных цепях. Режим доступа: <http://electrokaprizam.net/content/35-chto-takoe-kva-kwt-kvar>.
6. Zhuikov V.Y. Особливості компенсації миттєвої реактивної потужності в лінійних ланцюгах у перехідному режимі при вмиканні навантаження / V.Y. Zhuikov, I.V. Verbytskyi, O.F. Bondarenko // Електроніка та зв'язок — 2017, № 22 (4), с. 30-37.
7. Zhuikov, V.J., Verbytskyi, I.V., Kyselova, A.G. Reactive power compensation approach with dynamic mode of load current. Technical Electrodynamics — 2018, № 4, Pp. 47-52. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.047>
8. Вербицкий, Є. В. Компенсатор реактивної потужності у перехідних режимах / Є. В. Вербицкий, Р. М. Прибудько, Д. О. Зінченко, М. О. Мацюк // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. — Харків: НТУ «ХПІ». — 2018. — № 26 (1302). — Т. 2. — С. 121-125. — doi:10.20998/2413-4295.2018.26.42.
9. Zhuikov, Valery; Verbytskyi, Ievgen; Bondarenko, Oleksandr. Features of compensation of a reactive power at the transient mode. IEEE Conferece Electric Power Networks (EPNet), 2016. p. 1-4. doi: 10.1109/EPNET.2016.7999362.
10. Особенности работы тяговой подстанции. Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/elsnabg>.



11. М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, м.Челябінськ, Видавництво ЮУрГУ 2009, с.118-120
12. Влияние индуктивности рассеяния трансформатора на форму выпрямленного напряжения в 3-х фазной схеме выпрямителя с нулевым выводом. Режим доступа: <http://siblec.ru>.
13. Рух 27-го тролейбуса м.Київ. Режим доступа: <https://www.eway.in.ua/ru/cities/kyiv/routes/356>.
14. Схема тяговых подстанций. Режим доступа: <http://transphoto.ru/photo/651096>.
15. Розклад руху 27-го маршруту м. Київ. Режим доступа: <https://kpt.kiev.ua/information/passengers/timetable>.
16. В. К. Нем, В. І. Скуріхін, В. Ф. Сидоренко, Конспект лекцій з курсу «Тягові підстанції електричного транспорту», Харків – ХНАМГ – 2011
17. В.Сопов, М.Щуров Электроснабжение электрического транспорта на постоянном токе в 2 ч. Часть 1, Москва, Юрайт, 2018
18. Особенности подключения устройств компенсации реактивной мощности. Режим доступа: <https://protransformatory.ru/raschety/poteri-v-transformatore>.
19. Компенсация холостого хода трансформатора. Режим доступа: <http://n-tel.com.ua/bkxx.html>.
20. Конденсаторы для промышленных предприятий. Режим доступа: <http://www.kondensator.su>.
21. Дроссели мощные, высокого напряжения. Режим доступа: <http://eleris.ru/id/vhodnoy-drossel-acr-0200-75-kvt-400v-669.html>.
22. Высоковольтные тиристоры. Режим доступа: <https://asenergi.com/catalog/tiristory-silovye/tb143/tiristor-tb143-500.html>.
23. Представление сигналов и помех рядом Фурье. Режим доступа: [http://sernam.ru/book\\_tec.php?id=12](http://sernam.ru/book_tec.php?id=12).

24. LC-фильтр низких частот. Режим доступа:  
<http://audioakustika.ru/node/1450>.
25. Заграждающий LC-фильтр. Режим доступа:  
<http://www.dsplib.ru/content/notch/notch.html>.
26. Принципы управления тиристорами и симисторами. Режим доступа:  
<http://electricalschool.info/electronica/1961-principyu-upravlenija-tiristorami-i.html>.
27. Черных А.А, Тутов И.А, «Фазовый регулятор мощности с микроконтроллерным управлением», XX Міжнародна науково практична конференція «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ», ТПУ, Томськ, 2016
28. О.А. Гавриш, Методичні рекомендації до виконання розділу «Розробка стартап-проекту» магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей, Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016р.

## Схема компенсатора з встановленими фільтрами



## ABSTRACT

**Urgency of work.** Most electric power consumers are electric machines (transformers, asynchronous motors, arc welding equipment). This load, in addition to active power, also consumes reactive power, increasing by an average of 20-25% of the total power in relation to the active one. The parameter that determines reactive power consumption, called  $\cos(\varphi)$ .

The presence of reactive power in the grid reduces the quality of electric power, namely: leads to power losses in electric lines, to voltage fluctuations in electric lines, the need to overcharge the power transformers and the intersection of cables, voltage deposition in the power grid.

The compensation of the RP ensures the unloading of generators of power plants and distribution networks and transformers from reactive currents, thereby reducing the losses of power, energy and voltage in lines and transformers. As a result, their bandwidth increases. The use of reactive power compensation systems also allows for energy savings and economic efficiency, which in turn enables the use of savings to improve and upgrade the necessary industrial equipment.

**Relationship of work with scientific programs, plans, themes.** The work was performed at the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" at the Department of Industrial Electronics in the framework of the initiative research work.

**The purpose and tasks of the research.** The purpose of the dissertation is to develop a reactive power compensation device for the traction substation of the municipal trolley bus enterprise.

**The main tasks of the research are:**

- 1) to determine the reasons for the occurrence of reactive power in the circle of the traction substation;
- 2) to propose an algorithm for increasing the power factor.

*Subject of research* - features of generation of reactive power in transport substations;

*Object of research* - methods of compensation of reactive power.

**Research methods.** When solving the problems posed in the work for the implementation of the static compensator of reactive power, the theory of electric circuits, elements of higher mathematics (the decomposition of a signal in the Fourier series), as well as the theoretical foundations of the transforming technique were used.

**The scientific novelty of the research is as follows:**

- 1) the principle of compensation of reactive power for a traction substation is developed;
- 2) a method for reducing the load on the substation power transformer is proposed.

**The practical value of the results obtained:**

- 1) The proposed method of increasing the power factor almost 2 times;
- 2) The work of the compensator can save about 90 thousand UAH / month when paying for electricity.

**Approval of the results of work.** The results of the dissertation research were reported and discussed at the XHV International Internet Conference "SCIENTIFIC RESULTS OF 2018", Kyiv.

**Publications.** The main provisions and results obtained in the dissertation work were described in the following works:

1. Onishchenko O.M., Compensation of reactive power at traction substations, XHV International Internet Conference "SCIENTIFIC RESULTS OF 2018", collection of articles, Kyiv 2018.
2. Yamnenko Yu.S., Onishchenko O.M. Bioelectric module for wireless LAN, Scientific notes of the Taurian National University named after V.Vernadsky, Series: "Engineering", Vol. 29 (68). №4, Kyiv, 2018 Art. 181-185.

**Structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, five sections, conclusions, list of used sources from 28 titles. The total volume of dissertation work is 84 pages, including 81 pages of the main text of 31 drawings and 15 tables.